



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TIIA-RIIKKA HEINONEN

LUMEN IRTOAMINEN JUNAKALUSTOSTA RAITEEN EPÄJATKU-
VUUSKOHDISSA

Diplomityö

Tarkastajat: dos. Juha Miettinen ja
TkT Antti Nurmikolu
Tarkastajat ja aihe hyväksytty
Automaatio-, kone- ja materiaalitek-
niikan tiedekuntaneuvoston kokouk-
sessa 6. kesäkuuta 2012

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

HEINONEN, TIIA-RIIKKA: Lumen irtoaminen junakalustosta raiteen epäjatkuvuuskohdissa

Diplomityö, 115 sivua

Lokakuu 2012

Pääaine: Teknillinen mekaniikka

Tarkastajat: dos. Juha Miettinen, TkT Antti Nurmikolu

Avainsanat: lumi, jää, adheesiolujuus, junakaluston värähtely, raiteen epäjatkuvuuskohta, rautatievaihde

Tässä työssä perehdytään raiteen epäjatkuvuuskohtien ja junaan kertyneen lumen irtoamisen väliseen yhteyteen. Työn tarkoituksena on selvittää, millaisia värähtelyitä erilaiset epäjatkuvuuskohdat aiheuttavat junakalustoon, ja millainen herätevaikutus junaan kertyneen lumen irtoamiseksi vaaditaan.

Lumi kiinnittyy junan alustaan adheesiovoimilla, joiden suuruus riippuu merkittävästi monista eri tekijöistä, kuten esimerkiksi lämpötilasta. Raiteessa oleva epäjatkuvuuskohta aiheuttaa junaan herätteen, jonka johdosta junan alustarakenteeseen kertynyt lumi voi irrota. Tämä aiheuttaa ongelmia erityisesti vaihdealueella, sillä junan alustasta irronnut lumi voi pudota vaihteen kielen ja tukikiskon väliin estäen siten vaihteen liikkeen.

Työssä tehtiin kirjallisuusselvitys lumen ja jään ominaisuuksista. Samalla tarkasteltiin jään adheesiolujuutta teräkseen. Jää voi irrota teräksestä materiaalien liitoskohdasta, jolloin materiaalien välinen adheesioliitos katkeaa. Toisaalta jää voi myös murtua, jolloin jään koheesiosidokset katkeavat.

Työssä on selvitelty laskelmien ja mittauksen avulla erilaisten epäjatkuvuuskohtien aiheuttamia kiihtyvyyksiä junakalustossa. Lisäksi lumen irtoamista on tarkasteltu kuvaamalla kahta ongelmalliseksi todettua vaihdealuetta. Vaihdealueilla suoritettujen mittausten ja kuvausten avulla selvisi, että lunta irtoaa junan alustasta eniten lämpötilan ollessa hieman nollan asteen alapuolella. Työssä mitattiin myös junaan kohdistuvia kiihtyvyyksiä Helsinki–Joensuu-rataosuudella. Mittauksissa kävi ilmi, että vaihteiden aiheuttama herätevaikutus junakalustossa kasvaa junan nopeuden kasvaessa. Vaihteen epäjatkuvuuskohta aiheuttaa siis suuremmat kiihtyvyydet junakalustoon junan nopeuden kasvaessa. Mittauksen aikana keskimäärin suurimmat kiihtyvyyssamplitudit syntyivät juuri vaihteiden kohdalla, ja voidaankin sanoa vaihteiden olevan merkittävä värähtelyiden aiheuttaja junakalustossa. Jos junakalustoon kertynyt lumi siis irtoaa nimenomaan raiteen epäjatkuvuuskohdan aiheuttaman herätteen vaikutuksesta, on todennäköistä, että juuri vaihde aiheuttaa lumen irtoamisen.

Laskelmien avulla saadut lumen ja jään irtoamiseksi vaadittavat kiihtyvyydet ovat usein selvästi suurempia kuin mittauksissa saadut maksimikiihtyvyydet. Raiteen epäjatkuvuuskohdan aiheuttama kiihtyvyys ei siis yleensä yksinään riitä irrottamaan lunta ja jäätä. Lumen ja jään kiinnittymisvoimat vaihtelevat kuitenkin paljon, ja heikosti kiinnittynyt lumi voi irrota pienelläkin kiihtyvyyden arvolla. Junakalustoon kiinnittyneen lumen ja jään irtoamisen ja raiteen epäjatkuvuuskohtien välistä yhteyttä pitäisi tutkia vielä käytännössä, jotta saataisiin tarkempaa tietoa siitä, millaiset kiihtyvyydet riittävät irrottamaan junakalustoon kertynyttä lunta ja jäätä.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

HEINONEN, TIIA-RIIKKA: Detachment of snow from the rolling stock in rail irregularities

Master of Science Thesis, 115 pages

October 2012

Major: Applied Mechanics

Examiner: Docent Juha Miettinen, Dr. Tech. Antti Nurmikolu

Keywords: snow, ice, adhesion strength, vibration of rolling stock, rail irregularity, railway switch

In this Master's thesis, the connection between rail irregularities and the detachment of accumulated snow from the rolling stock is studied. The aim of this thesis is to discover the maximum acceleration values that different kinds of rail irregularities produce in rolling stock. Furthermore the excitation needed to detach the accumulated snow from the rolling stock is investigated.

Snow fastens to a train underframe by adhesion. The strength of this adhesion depends significantly on many factors, such as temperature. Rail irregularity causes an excitation on a train, and because of that, the accumulated snow may fall off the rolling stock. This causes problems in the switch areas, as the detached snow may fall between the stock rail and the switch blade preventing the movement of the switch.

In this thesis, the properties of snow and ice were studied by literature survey. The adhesion strength between ice and steel was explored as well. Ice may detach from the train underframe if the adhesion between ice and steel breaks off. Ice can also detach if the cohesive bonds in the ice break down.

The accelerations in a rolling stock caused by different rail irregularities were studied through calculations and measurements and the amount of the detached snow was assessed in two different switch areas. In these measurements, it was found that the average amount of the detached snow was greatest when the outside temperature was just below zero degrees Celsius. In addition, the accelerations in a rolling stock were measured in a railway section between Helsinki and Joensuu. It was found that the excitation produced by switches becomes higher as the speed of the train increases. During these measurements, the largest accelerations in a rolling stock were caused by rail irregularities in switches. Therefore, switch areas can be identified as a significant cause of vibrations in rolling stock and a probable reason for the snow to detach from the train underframe.

The calculated accelerations needed to detach the snow from the train are usually higher than the actual maximum accelerations measured during this thesis. Therefore, the accelerations caused by rail irregularities are usually not high enough to detach the snow from the train. Nevertheless, the adhesion strength between snow and steel is not constant, and even a small value of acceleration may detach some weakly adhered snow from the train. The connection between rail irregularities and the detachment of snow from the rolling stock should be studied further in practise to get more information about the accelerations needed to detach the snow from the train.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitoksella maa- ja pohjarakenteiden yksikössä. Työ kuuluu kisko–kalusto-vuorovaikutuksen tutkimusalueeseen, joka on yksi Liikenneviraston rahoittaman Elinkaaritehokas Rata (TERA) -tutkimushankkeen osa-alueista.

Haluan kiittää kaikkia niitä, jotka ovat mahdollistaneet tämän diplomityön valmistumisen. Suuret kiitokset kuuluvat työn ohjaajille dosentti Juha Miettiselle ja tekniikan tohtori Antti Nurmikolulle työn aikana saamistani neuvoista ja työn tarkastamisesta. Kiitokset ansaitsevat myös kaikki projektin mittausjärjestelyissä mukana olleet ihmiset, jotka mahdollistivat työn mittausten toteuttamisen ja avustivat mittaustulosten analysoinnissa. Haluan kiittää myös työn tilaajana toiminutta Liikennevirastoa erittäin mielenkiintoisesta diplomityön aiheesta sekä koko ratarakenteiden tutkimusryhmää rautatie-tekniikkaan tutustuttamisesta.

Lisäksi haluan kiittää perhettäni ja ystäviäni opiskelujen aikana saamastani tuesta ja kannustuksesta. Suurimmat kiitokset haluan osoittaa Pertulle päivittäisestä motivoinnista ja loputtomasta kärsivällisyydestä työn teon aikana.

Tampereella 21.9.2012

Tiia-Riikka Heinonen

SISÄLLYS

1	Johdanto.....	1
2	Lumen ja jään ominaisuuksista.....	3
2.1	Lumen eri muodot.....	4
2.2	Lumen fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet	5
2.3	Jään fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet	9
2.3.1	Koheesiovoimat.....	13
2.4	Jäätymisen fysiikka.....	14
2.5	Lumen ja jään kiinnittyminen rakenteeseen.....	16
2.5.1	Molekyylien väliset vuorovaikutukset rajapinnalla.....	16
2.5.2	Adheesiovoimat.....	17
3	Vaihteiden lumiongelmat	21
3.1	Lumen kertyminen junan alustaan ja vaihteisiin	21
3.2	Lumen irtoaminen junan alustasta	23
3.3	Vaihteiden lumiongelmiin vaikuttavat sääolosuhteet.....	25
3.4	Lumen poisto vaihteista	27
3.4.1	Lämmitys	28
3.4.2	Vaihteen kielen suojareuna	29
3.4.3	Muut menetelmät.....	29
3.5	Menetelmät lumen kerääntymisen ehkäisemiseksi.....	30
3.5.1	Jäänestoaineet.....	31
3.5.1	Muut menetelmät.....	32
3.6	Menetelmät lumen irrottamiseksi kalustosta.....	33
3.6.1	Raiteen epäjatkuvuuskohta.....	33
3.6.2	Muut menetelmät.....	35
4	Junakaluston värähtely ja herätteet	36
4.1	Värähtelyn teoriaa.....	36
4.1.1	Liiketyhtälöt	37
4.1.2	Ominaisaajuudet ja -muodot	39
4.1.3	Herätteet.....	39
4.2	Junakaluston värähtelykäyttäytyminen.....	41
4.2.1	Matkustajavaunu.....	45
4.2.2	Tavaravaunu	45
4.2.3	Ominaismuotojen laskeminen	47
4.3	Kaluston ja radan välisen dynamiikan mallintaminen.....	49
4.3.1	Radan värähtelyominaisuudet	49
4.3.2	Iskuvoimat P_1 ja P_2	50
4.4	Vaihteen mallintaminen	52
5	Tutkimusmenetelmät.....	54
5.1	Värähtelylaskelmat	54
5.1.1	Junakaluston mallintaminen.....	55

5.1.2	Ominaisvärähtelymuodot	56
5.1.3	Kiskojaatkos.....	57
5.1.4	Kiskopomppu	58
5.2	Lumen irtoamisen seuranta valikoiduissa vaihteissa.....	59
5.2.1	Seurattavien vaihteiden valinta	59
5.2.2	Seurantamenetelmä.....	61
5.2.3	Mittauslaitteet.....	64
5.3	Lumen kertymisen ja kiihtyvyyksien seuranta valikoidussa kalustossa.....	64
5.3.1	Kaluston valinta.....	65
5.3.2	Seurantamenetelmä.....	65
5.3.3	Mittauslaitteet.....	66
5.3.4	Kiihtyvyyksien tarkastelu	67
5.4	Raiteen epäjatkuvuuskohdan vaikutusten tarkastelu	69
5.4.1	Mittausjärjestelyt	69
5.4.2	Herätteet.....	70
6	Tulokset.....	72
6.1	Seuranta vaihteissa.....	72
6.1.1	Junan nopeuden vaikutus lumen irtoamiseen.....	72
6.1.2	Lämpötilan vaikutus lumen irtoamiseen.....	75
6.1.3	Muut lumen irtoamiseen vaikuttavat asiat	76
6.2	Seuranta kalustossa.....	77
6.2.1	Kiihtyvyydet suorilla linjaosuuksilla	77
6.2.2	Vaihteiden aiheuttama tyypillinen värähtely junakalustossa	82
6.2.3	Junan nopeuden vaikutus vaihteiden aiheuttamaan värähtelyyn.....	84
6.2.4	Junakaluston värähtely myötä- ja vastavaihteeseen ajettaessa.....	87
6.2.5	Muut vaihteiden aiheuttamaan värähtelyyn vaikuttavat asiat	88
6.2.6	Muiden epäjatkuvuuskohtien aiheuttama värähtely junakalustossa.....	89
6.3	Laskentatulokset	89
6.3.1	Ominaismuodot	90
6.3.2	Kiskojaatkos.....	91
6.3.3	Kiskopomppu	97
6.4	Pohdinta epäjatkuvuuskohtien vaikutuksista	103
6.4.1	Epäjatkuvuuskohtien aiheuttamat kiihtyvyydet	103
6.4.2	Lumen irtoaminen junakalustosta.....	104
7	Yhteenveto ja jatkotutkimusehdotukset	107

SYMBOLIT, LYHENTEET JA KÄSITTEET

α	kiskon kulmamuutos epäjatkuvuuskohdassa
γ	materiaalin pintaenergia
λ_n	ominaisarvo
ζ	suhteellinen vaimennuskerroin
ρ	tiheys
σ_x	taivutusjännitys
τ	jaksonaika
τ_a	adhesiivinen leikkauslujuus
ω_n	ominaiskulmataajuus
ϕ	vektorin vaihekulma
a	kiihtyvyys
c_0	koheesiolujuus lämpötilassa 0 °C
c	vaimennuskerroin
E	kimmomoduuli
f_n	ominaistaajuus
I_z	neliömomentti
k	jousivakio
k_H	Hertzin kontaktijäykkyys
m	massa
M_t	taivutusmomentti
R_m	murtolujuus
$\{\varphi\}$	ominaisvektori
$\{x\}$	kappaleen siirtymävektori
$\{\dot{x}\}$	kappaleen nopeusvektori
$\{\ddot{x}\}$	kappaleen kiihtyvyysvektori
$[M]$	massamatriisi
$[K]$	jäykkyysmatriisi
$[C]$	vaimennusmatriisi
YV	yksinkertainen vaihde
adheesio	kahden erillisen aineen välinen vetovoima
koheesio	aineen sisällä vaikuttava vetovoima, joka pitää ainetta koossa

1 JOHDANTO

Tämän diplomityön tarkoituksena on tutkia erilaisten kiskoherätteiden vaikutusta lumen ja jään irtoamiseen junakaluston alustarakenteista. Lumi ja jää ovat talviaikaan aiheuttaneet paljon ongelmia raideliikenteelle etenkin viimeisten vuosien aikana, ja yksi ongelma-alue on ollut vaihteiden toimimattomuus. Lumi voi kertyä vaihteisiin lumisateena tai siirtyä vaihteisiin tuulen mukana. Toisaalta lunta voi myös pudota vaihteisiin vaihteen yli kulkevasta junasta. Vaihteen kohdalla kiskossa oleva epäjatkuvuuskohta aiheuttaa junaan herätteen, jonka johdosta junan alustarakenteisiin kertynyt lumi irtoaa. Vaihteen kielen ja tukikiskon väliin pudonnut lumi- tai jääkappale voi estää vaihteen liikkeen ja aiheuttaa siten vaihteen toimimattomuuden. Kalustosta saattaa irrota lunta hetkessä suuria määriä, ja siksi erityisesti tämä kalustosta kertyvä lumi on vaihteiden kunnonapidon kannalta ongelmallista.

Tässä työssä on tarkasteltu junan alustarakenteisiin kertyneen lumen putoamista vaihdealueella ja muissa raiteen epäjatkuvuuskohdissa. Tarkoituksena on löytää yhteys junaan vaikuttavan herätteen ja lumen putoamisen välille. Lumen ominaisuudet eivät ole vakioita, vaan lumen käyttäytyminen on hyvin riippuvaista ympäröivistä olosuhteista. Lumen kiinnittymislujuuteen vaikuttaakin monta eri tekijää, joista esimerkiksi ympäristön lämpötila on hyvin merkittävä asia.

Työ koostuu lumen käyttäytymiseen liittyvästä kirjallisuusselvityksestä ja laskelmista, joiden avulla on tarkoitus selvittää kiskoherätteen ja lumen irtoamisen välistä yhteyttä. Lisäksi työssä on kaksi erilaista seurantamittauksiin perustuvaa osuutta. Tarkoitus on ensinnäkin kuvata kahta ongelmalliseksi todettua vaihdetta ja tarkastella niihin putoavaa lunta. Tällä pyritään selvittämään, minkälaisesta kalustosta lunta irtoaa eniten ja miten junan nopeus ja toisaalta sääolosuhteet vaikuttavat lumen irtoamiseen. Toisessa osiossa junan alustaan kiinnitetään kamera ja seurataan lumen kertymistä ja irtoamista junan alustarakenteissa yhden junamatkan aikana. Junaan on lisäksi kiinnitetty kiihtyvyysanturit, joiden avulla voidaan selvittää junaan kohdistuneen kiihtyvyyden ja lumen irtoamisen välistä yhteyttä. Samalla selviää, minkälaisia kiihtyvyyksiä vaihdealueet ja muut raiteen epäjatkuvuuskohdat aiheuttavat junaan.

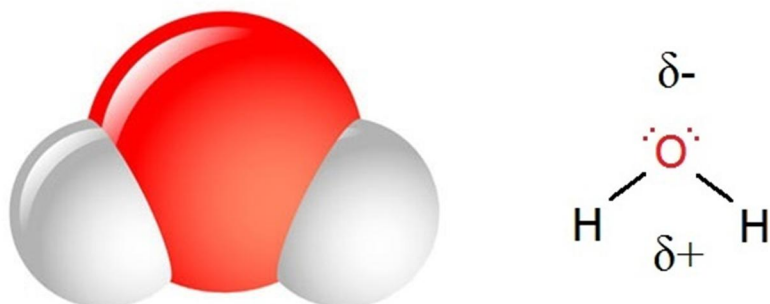
Luvussa 2 käsitellään lumen ja jään ominaisuuksia kirjallisuusselvityksenä. Samalla käydään läpi myös lumen kiinnittymistä rakenteeseen eli tarkastellaan lumen ja teräksen välillä vaikuttavia adheesiovoimia. Luvussa 3 keskitytään työn lähtökohtiin eli vaihteiden lumiongelmiin. Luvussa käydään läpi vaihteiden lumiongelmiin taustatiedot ja keinot, joilla ongelmaa on tähän mennessä yritetty ratkaista. Luvussa 4 käsitellään kaluston ja radan välistä värähtelyvuorovaikutusta. Luvussa kerrotaan junavaunun yleisestä värähtelykäyttäytymisestä sekä raiteen epäjatkuvuuskohtien aiheuttamista iskuvoimista ja niiden vaikutuksesta junakaluston värähtelykäyttäytymiseen. Junakaluston värähtelylii-

kettä voidaan kuvata liikeyhtälöillä, joiden avulla saadaan laskettua kaluston ominaisvärähtelymuodot. Luvussa 5 käsitellään työssä käytettyjä tutkimusmenetelmiä. Junakaluston dynaamista käyttäytymistä ja epäjatkuvuuskohtien junakalustoon aiheuttamia kiihtyvyyksiä tarkastellaan dynamiikkaohjelman avulla. Luvussa käydään myös läpi, miten työn käytännön osuudet on tehty. Vaihteisiin liittyvässä tutkimuksessa on selvitetty junakalustoon kertyneen lumen irtoamisen yhteyttä esimerkiksi ulkoilman lämpötilaan ja junan nopeuteen. Mittauksiin perustuvissa osuuksissa tarkastellaan myös erilaisten epäjatkuvuuskohtien junakalustoon aiheuttamia kiihtyvyyksiä. Luvussa 6 esitetään mittaus-ten ja laskelmien tulokset ja niistä tehdyt päätelmät, ja luvussa 7 esitetään vielä päätu-
loksien yhteenveto sekä jatkotutkimusehdotukset.

2 LUMEN JA JÄÄN OMINAISUUKSISTA

Lumen ja jään ominaisuudet vaihtelevat ympäröivien olosuhteiden, kuten esimerkiksi lämpötilan, mukaan. Lumen lujuusominaisuudet vaikuttavat merkittävästi siihen, kuinka paljon lumi aiheuttaa haittaa rautatievaihteessa. Toisaalta lujuusominaisuudet vaikuttavat myös siihen, kuinka helposti lumi irtoaa junan alustarakenteista.

Lumi ja jää koostuvat vesimolekyyleistä, jotka ovat kiinnittyneet toisiinsa vetysidoksilla. Vetysidos muodostuu vedyn ja jonkin hyvin elektronegatiivisen aineen, kuten hapen, välille. Näin muodostuva dipoli-dipolisidos on atomien suuren elektronegatiivisuuseron ja vetyatomin pienen koon vuoksi poikkeuksellisen luja. Vesimolekyylien välille muodostuvat vetysidokset aiheuttavat vedelle monia erityisiä fysikaalisia ominaisuuksia, kuten pintajännityksen ja molekyylin kokoon nähden poikkeuksellisen korkean kiehumis- ja sulamispisteen. Vesimolekyylin sisällä happi- ja vetyatomit ovat kiinnittyneet toisiinsa kovalenttisilla sidoksilla siten, että vetyatomit muodostavat $104,5^\circ$ kulman toisiinsa nähden (kuva 2.1). Vetysidoksien vahvuus on noin kymmenesosa kovalenttisen sidoksen vahvuudesta.



Kuva 2.1. Vesimolekyylin rakenne ja atomien osittaisvaraukset.

Lumi koostuu jääkiteistä, joten jään ja lumen erottaminen toisistaan määritelmien avulla on vaikeaa. Lumen ja jään välinen ero voidaan kuitenkin määritellä kiderakenteiden avulla: lumeksi kutsutaan jään sellaista muotoa, jolla on avoin kiderakenne. Tämän vuoksi kaikki lumen lujuusominaisuudet ovat selvästi heikommät kuin jäällä. (Petrovic 2003.) Lisäksi jään määritelmän mukaan vesimolekyylit esiintyvät jäässä aina kiinteässä olomuodossa. Lumen tapauksessa vesimolekyylejä voi esiintyä myös muissa olomuodoissa, ja lumipeite sisältääkin jääkiteiden lisäksi myös nestemäistä vettä ja kosteaa ilmaa (Rasmus 2007). Lumen tiheys vaihtelee paljon, mutta sen arvo on kuitenkin aina alhaisempi kuin jäällä.

Lumen ja jään lisäksi puhutaan lumijäästä, joka sijoittuu ominaisuuksiltaan jään ja lumen välille. Tässä työssä puhutaan yleisesti lumesta, ja mikäli ei muuta mainita, sillä tarkoitetaan lumen lisäksi myös lumijäätä ja jäätä.

Lumen ja jään ominaisuuksiin vaikuttaa merkittävästi se, millaisissa ilmastollisissa olosuhteissa niiden kiderakenteet ovat syntyneet. Saman aineen eri kiderakenteet voivat poiketa toisistaan hyvinkin paljon, ja siten myös aineen ominaisuudet voivat vaihdella selvästi. Lisäksi lumen ja jään ominaisuuksiin vaikuttavat huomattavasti ympäröivät olosuhteet. Tämän vuoksi lumen ja jään ominaisuuksia vertailtaessa tulee aina huomioida aineiden kiderakenne sekä tarkasteluolosuhteet.

2.1 Lumen eri muodot

Lumen kiderakenne ja ulkoilman lämpötila vaikuttavat selvästi siihen, kuinka paljon haittaa lumi aiheuttaa rautateillä. Ajon aikana lumiolosuhteet junan ympäristössä voivat vaihdella paljonkin. Tarkoituksena on löytää junan kulkemisen ja vaihteiden toiminnan kannalta hankalimmat lumiolosuhteet ja keskittyä niiden aiheuttamiin ongelmiin.

Seuraavassa on tarkasteltu sellaisia lumen ja jään olomuotoja, joista voi aiheutua haittaa raideliikenteelle.

Kuiva lumi (dry snow)

Kuiva pakkaslumi on kevyttä ja hienojakoista, joten lumihiuksiset pääsevät helposti kulkemaan tuulen mukana. Kuivan lumen aiheuttamat haitat on jaettu tuulen kuljettaman lumen ja pöllyävän lumen aiheuttamiin haittoihin. (Colbeck 1980.)

Tuulen kuljettama lumi (blowing snow)

Voimakas tuuli voi nostaa maasta irtonaista lunta ja kuljettaa sitä yli kahden metrin korkeuteen. Tuuli voi riepotella lumisateena tulevaa lunta tai nostaa jo maahan ehtineen lumen uudelleen liikkeelle. Tuulen kuljettama lumi on yleensä kuivaa pakkaslunta, joka on niin kevyttä, että se nousee helposti ilmaan. (Colbeck 1980; Oksanen 1999.)

Pöllyävä lumi (drifting snow)

Pöllyävän lumen tapauksessa tuuli nostaa maasta irtonaista ja kevyttä lunta, joka nousee korkeintaan kahden metrin korkeuteen. Pöllyävästä kuivasta lumesta on paljon haittaa maantie- ja rautatieliikenteessä, sillä se heikentää näkyvyyttä ja aiheuttaa lumikertymiä tielle. Pöllyävä lumi ei estä näkyvyyttä yli kahden metrin korkeudessa, joten esimerkiksi lentoliikenteelle siitä ei ole haittaa. (WeatherOnline 2012.)

Kovassa tuulessa kulkeutuva pöllyävä lumi voi pakkautua tiiviiksi eli sintrautua kohdatessaan esteen. Lumen sintrautuessa kiinteäksi sen lujuus kasvaa ja lumen poistaminen esimerkiksi rautatievaihteesta vaikeutuu. (Salmenperä & Nurmikolu 2012.)

Tykkylumi

Tykkylumi tarkoittaa puiden oksiin lujasti kiinni tarttunutta lumikertymää. Tykkylumen syntymiseksi tarvitaan suuri ilmankosteus ja fysikaalinen tarttumismekanismi, joka kiinnittää veden puihin. Pääasiallisesti lumi kertyy puihin huurtumalla tai kostean lumen

tarttumisen ja jäätyamisen seurauksena. (Ilmatieteen laitos 2012.) Lumi voi tarttua junan alustaan samantyyppisellä mekanismilla kuin tykkylumi tarttuu puihin.

Kuura (frost)

Kuura on jääkiteiden muodostama valkoinen peite rakenteiden pinnassa. Kuura syntyy, kun vesihöyry tiivistyy pakkasella suoraan kiinteäksi olomuodoksi eli härmistyy. (Ilmatieteen laitos 2012.) Kuurajään ominaispaine on alhainen, joten se ei lisää junan jääkuormaa merkittävästi. Kuurajää voi kuitenkin muodostua myös junan alustan suojausten alle ja toimia alijäähtyneen veden kerääjänä. Tämä nopeuttaa jään kerääntymistä junan alustaan. (Salmenperä & Nurmikolu 2012.)

Huurre (frost)

Huurre on yhtä lailla jääkiteiden muodostama peite rakenteiden pinnassa. Erona kuuraan on huurteen muodostumistapa. Huurre muodostuu ilman suhteellisen kosteuden ollessa 100 %. Tällöin ilmasta tiivistyy alijäähtyneen nesteen pisaroita, jotka tarttuvat pintoihin ja jäätyvät niihin kiinni. (Ryerson 2008.)

Huurre voi kasvaa paksuksi tykkylumikerrokseksi (Ilmatieteen laitos 2012). Yleensä huurteen kerrospaksuudet ovat kuitenkin hyvin pieniä, ja huurre ei muodosta jäätä ongelmaksi asti. (Salmenperä & Nurmikolu 2012.)

Alijäähtynyt vesi (supercooled water, atmospheric ice)

Alijäähtynyt vesi jäätyy pakkasessa heti osuessaan kiinteään kappaleeseen. Kappaleeseen kertynyt jää on läpinäkyvää, ja kerrospaksuudet ovat tyypillisesti alle 30 mm. Kaikki avoimet rakenteet ovat alttiina jäätymiselle. (Ryerson 2008; Salmenperä & Nurmikolu 2012.)

Rakeet

Rakeet syntyvät vesihöyryn jäätyessä jonkin kiinteän pinnan, kuten esimerkiksi pölyhiukkasen, ympärille. Rakeet tarvitsevat voimakkaita nousevia ilmavirtauksia, jotka kuljettavat kehittyvät raealkiot ylös pilven keski- ja yläosiin jäätymään ja kiinteytymään. (Ilmatieteen laitos 2012.)

Rakeet voivat olla halkaisijaltaan jopa 80 mm, joten ne voivat teoriassa aiheuttaa haittaa rautatievaihteessa ajautuessaan vaihteen kielen ja tukikiskon väliin. Näin suuret rakeet ovat kuitenkin erittäin harvinaisia.

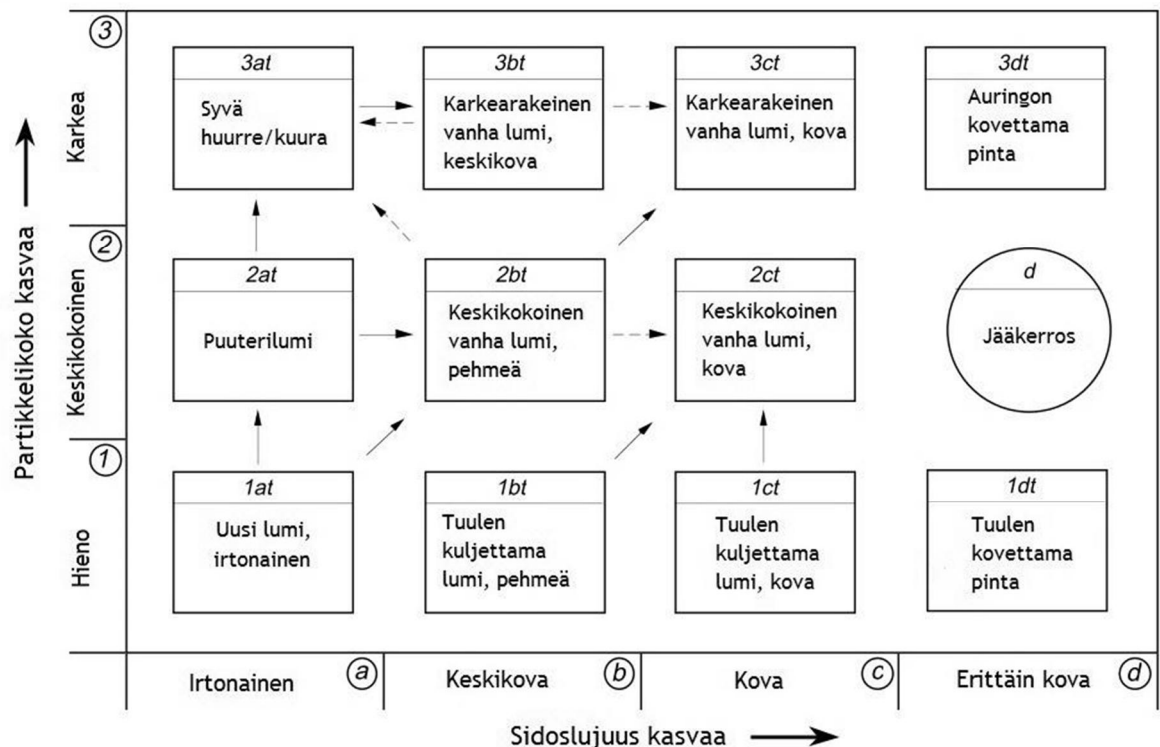
2.2 Lumen fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet

Lumen fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet riippuvat lumen rakenteesta ja ympäröivistä olosuhteista. Monet lumen ominaisuudet riippuvat lumen tiheydestä, ja esimerkiksi lumen lujuusominaisuudet voidaan päätellä pitkälti lumen tiheyden perusteella. Lumen tiheys vaihtelee paljon, esimerkiksi uuden lumen tiheys on noin 10–300 kg/m³. Kaikkein kevyintä lunta sataa kovalla pakkasella ilman ollessa kuiva. (Oksanen 1999.)

Lumen tiheys riippuu lumipartikkeleiden määrästä ja muodosta, ulkoilman lämpötilasta sekä lumen lujuuskehittymisestä. Lumen lujuuskehittyminen kuvaa lumen lujuusominaisuuksien muuttumista ajan suhteen. Talven aikana lumipeitteen tiheys kasvaa hitaasti alkutalven noin 200 kg/m^3 arvosta keväiseen maksimitiheuteen, joka on Suomessa noin $300\text{--}400 \text{ kg/m}^3$ (Oksanen 1999). Lumipeitteen tiheyden kasvu johtuu lumikiteiden sidoksia muuttavista metamorfooseista. Metamorfoosit eli muodonmuutokset alkavat heti lumisateen jälkeen ja jatkuvat siihen asti, kunnes lumi sulaa. Metamorfoosit aiheuttavat muutoksia lumikiteisiin ja niiden välisiin sidoksiin ja sitä kautta lumen rakenteeseen ja ominaisuuksiin. Lumen ominaisuudet siis muuttuvat jatkuvasti.

Lumikiteiden metamorfoosiin vaikuttavat ympäröivät olosuhteet, kuten esimerkiksi auringon säteily ja tuulen voimakkuus. Tuulen vaikutusta lumikiteisiin kutsutaan mekaaniseksi metamorfoosiksi. Kun hiukkaset kulkeutuvat tuulen mukana, niiden sakarat rikkoontuvat ja ne menettävät alkuperäistä muotoaan. Tämän vuoksi ne kykenevät pakautumaan tiiviimmäksi lumikerrokseksi ja lumen tiheys kasvaa. Lumen tiheyteen vaikuttavat omalta osaltaan myös painovoima ja terminen metamorfoosi. Termisessä metamorfoosissa lämpimän maaperän ja kylmän ilman väliset lämpötilaerot aiheuttavat ajan kuluessa jääkiteiden muuttumisen tahkomaisiksi. (Oksanen 1999.)

Lumen lujuus riippuu lähinnä erillisten jääpartikkelien sidoslajuudesta, partikkelien muodosta ja partikkelien keskinäisten sidosten lukumäärästä (Petrovic 2003). Kuvasta 2.2 nähdään lumipartikkelien koon ja sidoslajuuden välinen yhteys eri lumityypeillä.



Kuva 2.2. Lumityyppien sijoittuminen sidoslajuuden ja partikkelikoon perusteella (Shapiro et al. 1997).

Lumen lujuuteen vaikuttaa oleellisesti myös lumen tiheys, joka vaikuttaa lumikiteiden välisten sidosten määrään. Lumen tiheyden kasvaessa yhä useammat lumipartikkelit joutuvat kosketuksiin keskenään ja lumikiteiden välisten sidosten määrä kasvaa. Tämän vuoksi lumen tiheyden kasvaessa myös sen lujuusominaisuudet paranevat. Lumen tiheyden aikariippuvuutta voidaan kuvata yhtälön 2.1 avulla (Martinec 1977):

$$\rho(t) = \rho_0(1 + t)^{0.3} \quad (2.1)$$

missä

t on lumen satamisesta kulunut aika vuorokausina

ρ_0 on uuden lumen keskimääräinen tiheys, 100 kg/m³

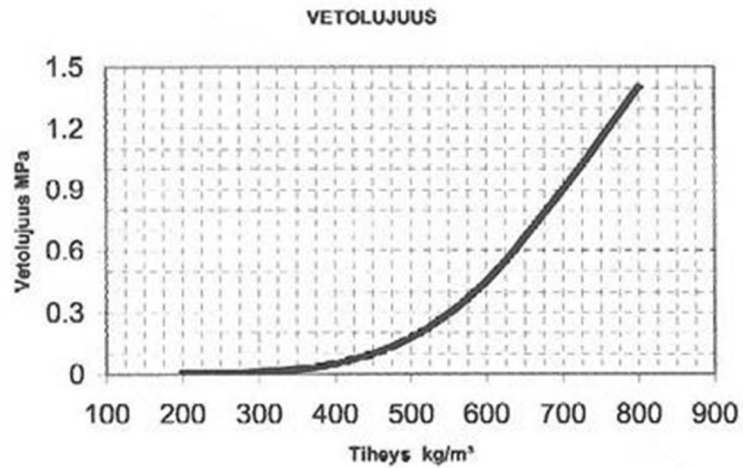
Tiheyden lisäksi lumen ominaisuuksiin vaikuttaa lumipartikkelien koko. Lumipartikkelien koko määritellään yleensä lumessa olevien jääkiteiden koon mukaan. Yleensä lumessa olevien jääkiteiden koko vaihtelee välillä 0,1–3 mm. Vastasataneessa kuivassa ja kevyessä lumessa partikkelikoko voi olla vain 0,01 mm.

Taulukossa 2.1 on lueteltu lumen lujuusarvoja.

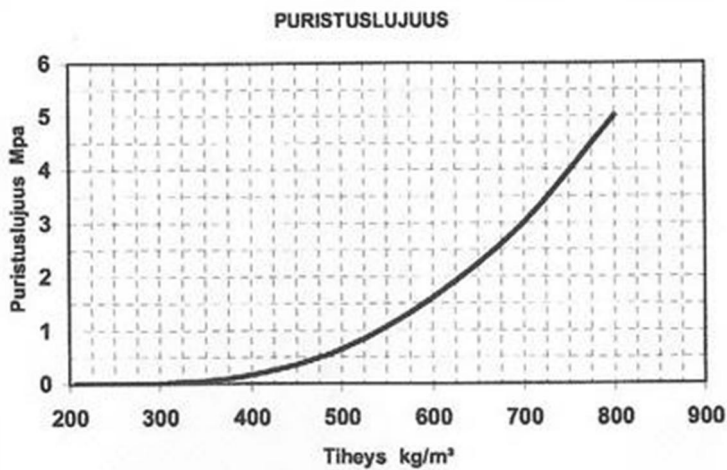
Taulukko 2.1. Lumen lujuusarvoja.

Kimmokerroin (GPa)	0,1-3 (RIL 2001)
Vetolujuus (MPa)	0-1,4 (RIL 2001) 0-0,3 (Petrovic 2003)
Puristuslujuus (MPa)	0-5 (RIL 2001) 0-2,5 (Hirochi et al. 2004)
Leikkauslujuus (MPa)	0-0,9 (RIL 2001) 0-1 (Shapiro et al. 1997)
Adheesiolujuus teräkseen (MPa)	0,086-0,134 (lumijää) (Jellinek 1960)
Koheesiolujuus (MPa)	0,01-0,035 (Shapiro et al. 1997)

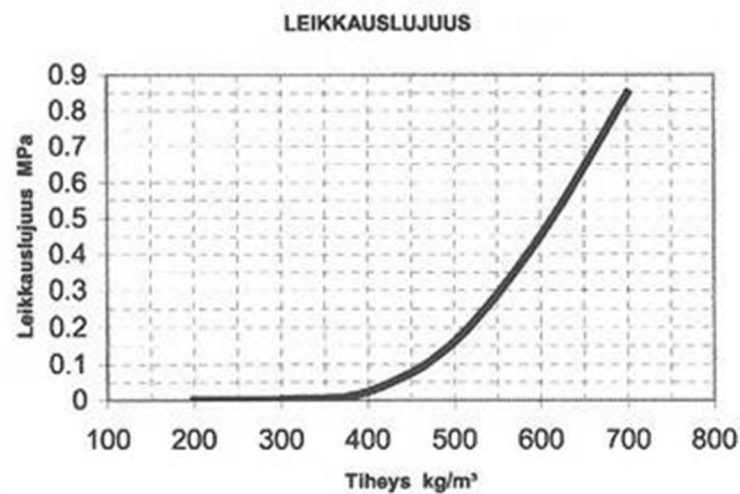
Arvoista huomataan, että lumen puristuslujuus on noin neljä kertaa suurempi kuin lumen vetolujuus. Lujuusarvoilla on suuret vaihteluvälit, sillä lumi alkaa saada lujuusominaisuuksia vasta sen tiheyden ollessa yli 400 kg/m³. Lumirakenteiden suunnittelu- ja rakentamisohjeessa RIL 218-2001 lumen lujuusarvot onkin määritetty lumen tiheyden mukaan. Ohjeen mukaiset lujuusarvot on esitetty kuvissa 2.3–2.5.



Kuva 2.3. Lumen vetolujuus tiheyden funktiona (RIL 2001).



Kuva 2.4. Lumen puristuslujuus tiheyden funktiona (RIL 2001).

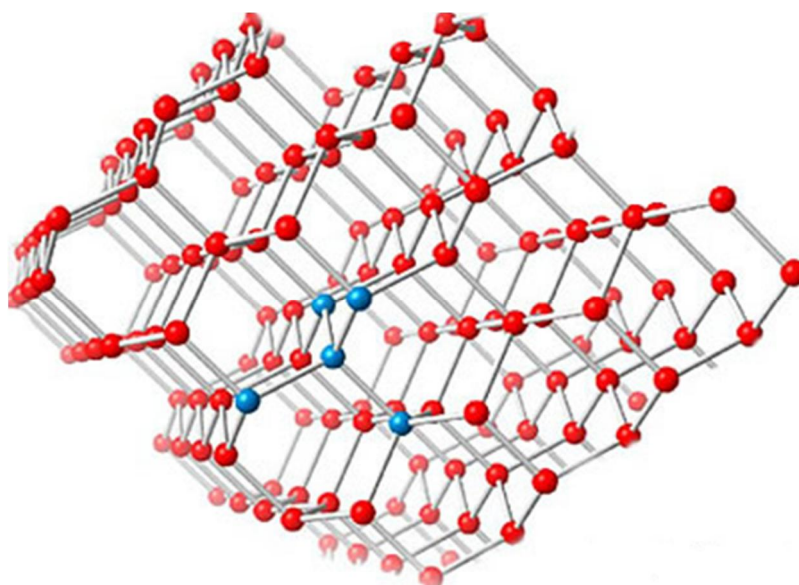


Kuva 2.5. Lumen leikkauslujuus tiheyden funktiona (RIL 2001).

Kuvista huomataan, että lumen lujuusarvot todella alkavat kasvaa vasta tiheyden ylittäessä 400 kg/m^3 . Käyrät jatkuvat vain tiheyteen 800 kg/m^3 saakka, sillä tiheyden ollessa korkeampi lumi alkaa jo käyttäytyä jään tavoin. Tällöin ei puhuta enää lumesta, vaan lumen ja jään väliin sijoittuvasta lumijäästä.

2.3 Jään fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet

Jäässä vesimolekyylit muodostavat täydet neljä vetysidosta, jolloin normaaleissa jäätymisolosuhteissa jäälle muodostuu kuvan 2.6 mukainen säännöllinen heksagonaalinen rakenne.



Kuva 2.6. Jään heksagonaalinen rakenne (Janda Lab 2008).

Jään molekyylirakenne vie paljon tilaa, sillä vetyatomien $104,5^\circ$ kulma aiheuttaa sen, että rakenne pysyy väljänä. Tilaa vievän molekyylirakenteen vuoksi jään tiheys on pienempi kuin nestemäisellä vedellä.

Toisin kuin lumen tapauksessa jään tiheys on yleensä melko vakio, $\rho = 917 \text{ kg/m}^3$. Tämä johtuu jään heksagonaalisesta kiderakenteesta, joka pysyy normaaliolosuhteissa muuttumattomana. Jään lujuusarvoihin vaikuttavat kuitenkin monet muut tekijät, kuten esimerkiksi lämpötila, aineen suolapitoisuus, aineen kidekoko ja kuormitusnopeus (Holtinen et al. 1998). Toisaalta jään lujuus riippuu myös kuormituksen suunnasta. Jää voi olla 2–3-kertaa lujempaa pystysuunnassa vaakasuuntaan verrattuna (Mohamed & Farzaneh 2011). Taulukossa 2.2 on lueteltu jään lujuusarvoja. Jään puristuslujuus on erittäin suuri, mutta veto- ja leikkauslujuus selvästi pienempiä.

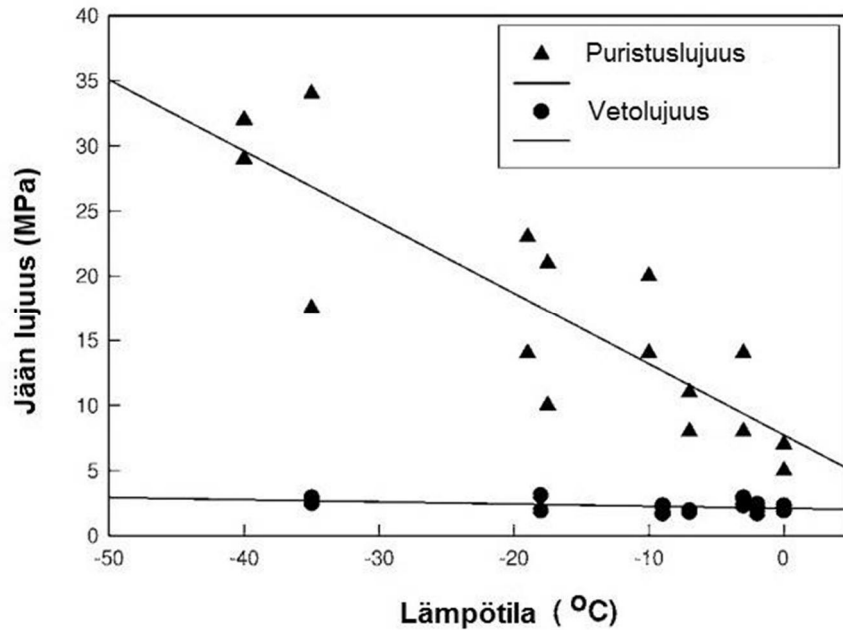
Taulukko 2.2. Jään lujuusarvoja.

Kimmokerroin, luonnonjää (GPa)	3–6 (Holtinen et al. 1998)
Kimmokerroin, ehyt jää (GPa)	9,7–11,2 (Petrovic 2003) 9,3 (Schulson 2001) 9 (Holtinen et al.1998)
Vetolujuus (MPa)	0,9–1,6 (Mohamed & Farzaneh 2011) 0,7–3,1 (Petrovic 2003)
Puristuslujuus (MPa)	2,3–5,1, T = –6°C...–20°C (Kermani et al. 2007) 5–25, T = –10°C...–20°C (Petrovic 2003) 4–20 (Schulson 2001) 0,3–4,5 (Holtinen et al. 1998)
Taivutuslujuus (MPa)	0,25–0,7 (Holtinen et al.1998)
Leikkauslujuus (MPa)	0,2–0,6 (Holtinen et al.1998)
Koheesiolujuus (MPa)	1,57–1,67 kohesiivinen leikkauslujuus (Jellinek 1959, Seppingsin 2005 mukaan)
Myötöraja (MPa)	12–20, T = –15...–45°C (Seppings 2005) 5–13, T = –20°C (Xu et al. 2003 & 2004, Seppingsin 2005 mukaan) 6–26 (Jones 1982)
Poissonin vakio ν	0,29–0,32 (Petrovic 2003) 0,325 (Schulson 2001)

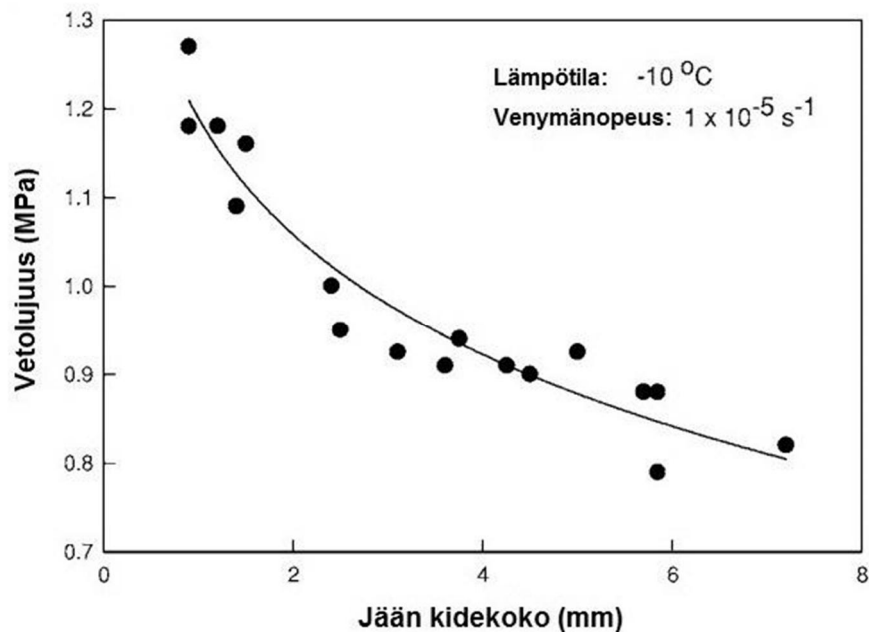
Jään lujuusarvoille löytyy kirjallisuudesta hyvinkin erilaisia arvoja. Arvoja tarkastellessa tuleekin aina huomioda muun muassa mitatun jään suolapitoisuus, kuormitusnopeus tai venymänopeus ja lämpötila, jossa mittaukset on suoritettu. Esimerkiksi jään puristuslujuuden arvot vaihtelevat kirjallisuudessa paljon. Tämä johtuu ainakin siitä, että jään puristuslujuus kasvaa lämpötilan laskiessa, joten eri lämpötiloissa suoritettut mittaukset antavat puristuslujuudelle erilaisia tuloksia. Myös venymänopeus vaikuttaa selvästi puristuslujuuden arvoon. Vetolujuus sen sijaan ei juuri riipu lämpötilasta eikä venymänopeudesta (Petrovic 2003; Mohamed & Farzaneh 2011). Vetolujuuden arvo kuitenkin laskee kidekoon kasvaessa, joten myös kidekoko tulee huomioda lujuusarvojen käytössä.

Kuvassa 2.7 on kuvattu jään vetolujuuden ja puristuslujuuden riippuvuutta lämpötilasta. Vetolujuuteen lämpötila ei vaikuta, mutta puristuslujuus kasvaa jopa 7-kertaiseksi lämpötilan laskiessa. Tämän on katsottu johtuvan jään lämpötilariippuvaisesta vaurion

muodostumisesta (Petrovic 2003). Kuvassa 2.8 on kuvattu vetolujuuden riippuvuutta jään kidekoosta.



Kuva 2.7. Jään puristuslujuuden ja vetolujuuden riippuvuus lämpötilasta (Petrovic 2003).



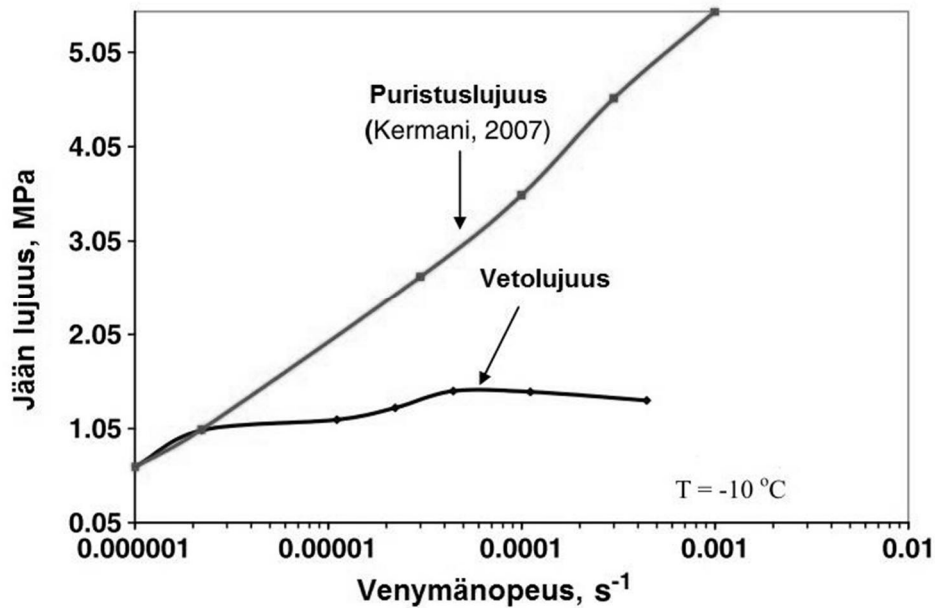
Kuva 2.8. Vetolujuuden riippuvuus jään kidekoosta (Petrovic 2003).

Jään vetolujuus kasvaa jopa kaksinkertaiseksi jään kidekoon pienentyessä. Puristuslujuuteen jään kidekoolla ei ole vaikutusta.

Alhaisilla venymänopeuksilla jään käyttäytyminen on sitkeää ja viskoelastista. Tällöin jäässä ei havaita merkkejä vaurioista tai säröistä (Kasaai & Farzaneh 2004, Javan-Mashmoolin 2005 mukaan). Korkeilla venymänopeuksilla jää on haurasta. Hauraalla

alueella säröjä muodostuu helposti ja ne kehittyvät usein murtumaan saakka. Säröillä on suuri merkitys jään lujuuteen, muodonmuutokseen ja murtumiseen (Gold 1970, Javan-Mashmoolin 2005 mukaan).

Venymänopeudella ei kuitenkaan ole havaittu olevan juurikaan merkitystä vetolujuuteen (Mohamed & Farzaneh 2011). Kuvassa 2.9 on kuvattu jään veto- ja puristuslujuutta venymänopeuden funktiona. Vetolujuus ei juuri riipu venymänopeudesta, mutta puristuslujuuteen venymänopeudella on suuri vaikutus.

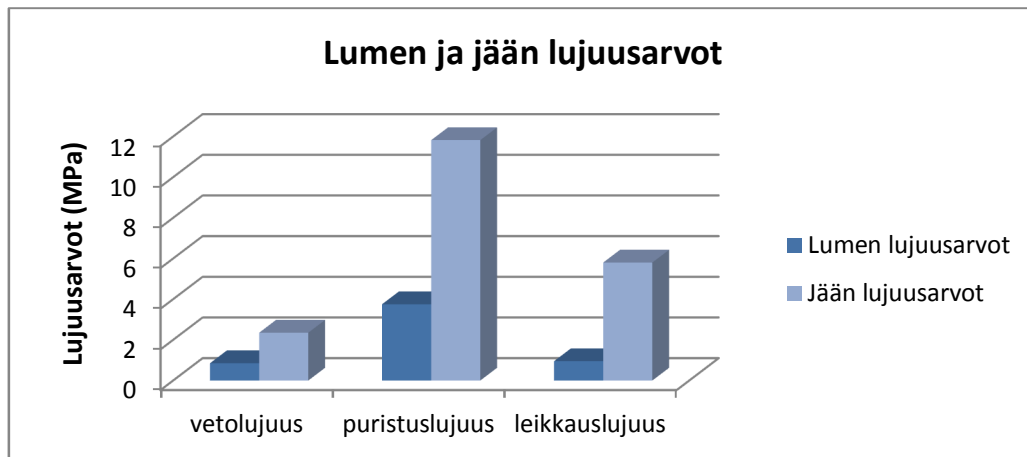


Kuva 2.9. Jään veto- ja puristuslujuus venymänopeuden suhteen (Mohamed & Farzaneh 2011).

Kuvaajasta nähdään, että pienillä venymänopeuksilla puristus- ja vetolujuuden arvot ovat suunnilleen samanlaiset. Kun venymänopeus on pieni, materiaalin muodonmuutokset johtuvat lähinnä uudelleen kiteytymisestä. Suuremmilla venymänopeuden arvoilla jäätien puristuslujuus alkaa kasvaa. (Mohamed & Farzaneh 2011.) Venymänopeus on suoraan yhteydessä kuormitusnopeuteen, joten kuormitusnopeuden kasvaessa jäätien puristuslujuus kasvaa.

Eri kuormitustilanteissa jää voi käyttäytyä joko sitkeän tai hauraan materiaalin tavoin. Materiaalin käyttäytymistä arvioitaessa tulee huomioida, millä venymänopeusalueella kuormitustilanteessa liikutaan. Junaan kertyneen lumen ja jäätien irtoamisen kannalta jäätien vetolujuudella on enemmän merkitystä kuin jäätien puristuslujuudella. Tämän vuoksi jäätien venymänopeudella ei kuvan 2.9 perusteella ole suurta vaikutusta junaan kertyneen jäätien käyttäytymiseen. Kuvan 2.7 mukaan jäätien vetolujuuteen ei vaikuta myöskään lämpötila. Lämpötila vaikuttaa kuitenkin jäätien adheesiolujuuteen ja sitä kautta jäätien irtoamiseen junan alustasta.

Kuvassa 2.10 on vertailtu taulukoista 2.1 ja 2.2 saatuja lumen ja jäätien keskimääräisiä maksimilujuusarvoja. Jäätien lujuusarvot ovat kaikilta osin paremmat kuin lumella.



Kuva 2.10. Lumen ja jään lujuuksien keskimääräiset maksimiarvot.

Myös kimmokertoimen arvo on jäällä vähintään kaksinkertainen lumen kimmokertoimen verrattuna. Kimmokerroin ilmaisee materiaalin sisäistä jäykkyyttä.

2.3.1 Koheesiovoimat

Koheesio kuvaa molekyylien välisten sidosten lujuutta materiaalin sisällä. Vesimolekyylit alkavat muodostaa molekyylisidoksia keskenään noin 0 °C:n lämpötilassa. Kun lämpötila laskee, sidoksia alkaa muodostua lisää. Samalla jään koheesiolujuus kasvaa. Tällä perusteella voidaan siis sanoa, että jään koheesiolujuus riippuu lämpötilasta. Lämpötilan vaikutusta koheesioon voidaan kuvata seuraavalla tavalla (Fish & Zaretsky 1997):

$$c(T) = c_0 e^{\alpha(1-T/T_m)} \quad (2.2)$$

missä

c on jään koheesiolujuus lämpötilassa T

c_0 on jään koheesiolujuus lämpötilassa 0 °C

T on lämpötila (K)

T_m on jään sulamislämpötila (K)

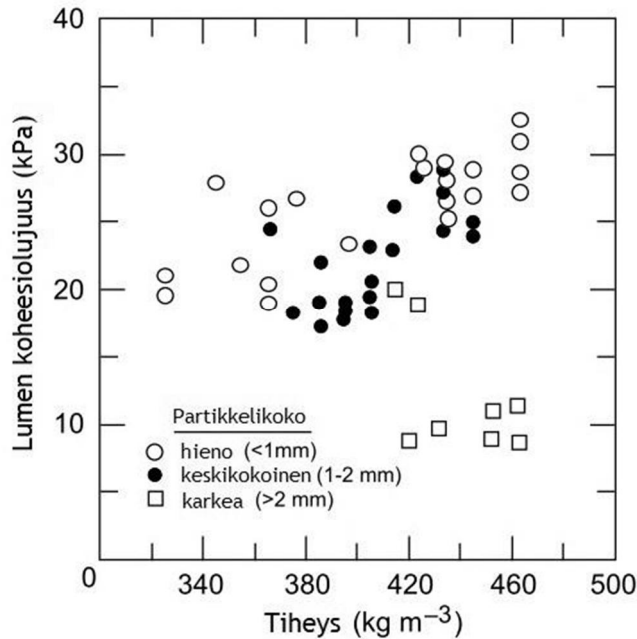
α on jäätyypistä riippuva parametri, esimerkiksi 9,61 (Fish & Zaretsky 1997)

Kaavan 2.2 mukaan jään koheesiolujuus voi kasvaa jopa kolminkertaiseksi lämpötilan laskiessa 0 °C:sta –30 °C:een.

Jään koheesiolujuus määrää jään kaikki lujuusominaisuudet. Koheesio vahvuuteen vaikuttavat jään rakenne ja kidekoko. Toisaalta on myös esitetty (Fish & Zaretsky 1997), että jään hiukkaskoko ei juuri vaikuttaisi jään koheesiolujuuteen, vaan jään koheesiolujuuden määräisi lähinnä jään rakenne.

Lumen koheesiolujuuteen vaikuttavat samat ominaisuudet, jotka määrittävät lumen lujuuden: erillisten jääpartikkelien sidoslujus, partikkelien muoto ja koko sekä partikkelien keskinäisten sidosten lukumäärä. Lumessa jääpartikkelit muodostavat keskenään

vähemmän sidoksia kuin jäässä, joten lumen koheesiolujuus on aina pienempi kuin jäällä. Kuvassa 2.11 on kuvattu lumen koheesiolujuutta tiheyden suhteen.



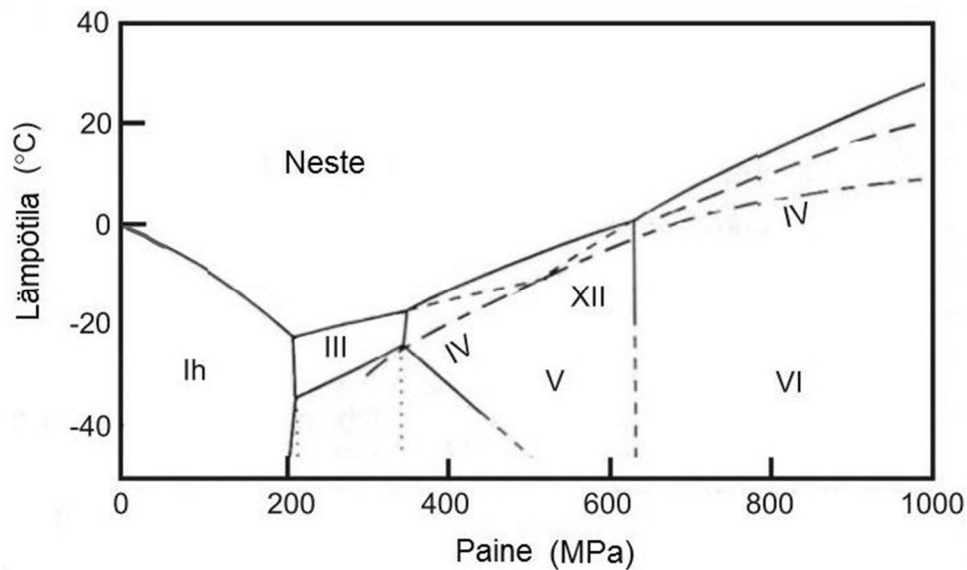
Kuva 2.11. Lumen koheesiolujuus tiheyden suhteen (Shapiro et al. 1997).

Kuvasta huomataan, että jääpartikkelien koon pienentyessä koheesiolujuus kasvaa. Toisaalta myös lumen tiheydellä on jonkin verran merkitystä koheesiolujuuteen: kun tiheys kasvaa, partikkelien välille muodostuu enemmän sidoksia ja siten myös koheesiolujuus kasvaa. Lumen koheesiolujuus ja sitä myötä myös lumen lujuusarvot ovat kuitenkin aina selvästi pienempiä kuin jäällä.

2.4 Jäätymisen fysiikkaa

Jää on veden kiinteä olomuoto, ja sitä voi muodostua nestemäisestä vedestä tai vesihöyrystä. Jäällä on monia eri kidemuotoja eli faaseja, joista jokainen voi muodostaa erilaisia rakenteita.

Jäällä on tällä hetkellä 15 tunnettua faasia, joista jokainen edustaa erilaista tapaa, jolla vesimolekyylit voivat ryhmittäytyä. Normaaliolosuhteissa selvästi yleisin muodostuva kidemuoto on heksagonaalinen I_h : kun vesi jäätyy normaalissa ilmanpaineessa, muodostuvalla jäällä on kuvan 2.12 mukaisesti aina heksagonaalinen I_h -kiderakenne (Sepings 2005). Tässä työssä on tarkasteltu tarkemmin ainoastaan I_h -faasissa olevan jään rakennetta, sillä normaaliolosuhteissa syntyvällä jäällä on lähes poikkeuksetta heksagonaalinen I_h -kidemuoto.



Kuva 2.12. Osa jään faaseista eri lämpötiloissa ja paineissa (Seppings 2005).

Jää voi muodostaa monenlaisia olosuhteista riippuvia rakenteita I_h -faasissa. Seuraavassa on lueteltu yleisimpiä jään rakenteita.

Jääkiteet (Ice Single Crystals)

Jääkiteet ovat perusta kaikille muille jään olomuodoille, joita voi muodostua. Kiteet säilyttävät jään heksagonaalisen rakenteen. Jääkiteiden kidekoko on suuri. Jääkide voi kasvaa useita metrejä pitkäksi ja olla tällöin jopa 50 mm leveä. (Seppings 2005.)

Monikiteinen jää tai rakeinen jää (Polycrystalline Ice/ Granular Ice)

Jään rakeisessa muodossa jääkiteet ovat suuntautuneet sattumanvaraisesti. Tiiviisti pakautunut monikiteinen jää muodostuu, kun vesi jäätyy kylmälle metallipinnalle. (Seppings 2005.)

Pilarijää (Columnar Ice)

Pilarijää koostuu useista rinnakkaisista pilarimaisista jääkiteistä. Tämä on yleinen jäärakenne luonnossa. (Seppings 2005.)

Dendriittinen jää (Dendritic Ice)

Dendriittisessä rakenteessa jään rakenne on haarautuva. Rakenteessa on peruskide, josta muut kiteet haarautuvat. Rakenne ei ole kovin kestävä, sillä monet haarautuneet jääkiteet rikkoutuvat ajan myötä. Dendriittinen rakenne voi muodostua, kun epäpuhtauksia sisältävä vesi jäätyy kylmälle metallipinnalle. (Seppings 2005.)

Jään muodostuminen voi tapahtua monella eri tapaa, ja muodostumismekanismeilla on suuri vaikutus jään rakenteeseen ja mekaanisiin ominaisuuksiin. Erilaiset mekanismit voidaan luokitella primääriseen (*Primary / Bulk nucleation*) ja sekundääriseen (*Secondary / Contact nucleation*) tiivistymiskeskuksen muodostumiseen.

Primäärinen mekanismi (Primary / Bulk nucleation)

Primäärisessä tiivistymiskeskuksen muodostumisessa jää muodostuu homogeenisen mekanismin avulla. Jäätymisen aiheuttaa vesimolekyylien yhteentörmäys ja sen jälkeen tapahtuva kasaantuminen. Primäärinen jään muodostuminen ei tarvitse jäätymisydintä. (Hobbs 1974; Seppings 2005.)

Sekundäärinen mekanismi (Secondary / Contact nucleation)

Sekundäärisessä tapauksessa jään muodostumismekanismi on heterogeeninen. Tässä vaihtoehdossa jokin epäpuhtaus edesauttaa jään muodostumista toimimalla jäätymisytimenä, jonka ympärille jäätyminen alkaa tapahtua. (Hobbs 1974; Seppings 2005.)

Heterogeeninen jäätyminen alkaa heti lämpötilan laskiessa 0 °C:n alapuolelle, kun taas homogeenista jäätymistä tapahtuu vain alle -40 °C:n lämpötiloissa. Normaaliolosuhteissa jäätyminen tapahtuukin yleensä heterogeenisesti, eli kiteytyminen alkaa käytännössä aina jonkin epäpuhtauden ympärille. (Oksanen 1999.)

2.5 Lumen ja jään kiinnittyminen rakenteeseen

Jää kiinnittyy kiinteään kappaleeseen adheesiovoimalla. Jään adheesiolujuus metalleihin on suurempi kuin jäämolekyylien keskinäinen koheesiolujuus, joten jäätä poistettaessa jää ei yleensä irtoa jään ja metallin liitoskohdasta vaan murtuu. Metallia ei tällöin puhdistu jäädä (Kivioja 2007). Toisaalta lämpötilan ollessa tarpeeksi korkea, jään irtoaminen voi olla myös adheesiivista, jolloin jää irtoaa kappaleiden liitoskohdasta.

Jäätymisen ja jään suuri adheesiolujuus aiheuttavat ongelmia muun muassa lentokoneen siivissä, laivoissa ja voimalinjoissa. Ennen jään poistamismenetelmien kehittämistä tulee ymmärtää rajapintojen fysiikkaa ja jään kiinnittymisessä vaikuttavia adheesiovoimia. Jää on poikkeuksetta lujempaa ja jäykempää kuin lumi, joten tässä kappaleessa on keskitytty lähinnä jään kiinnittymiseen rakenteeseen.

2.5.1 Molekyylien väliset vuorovaikutukset rajapinnalla

Jään pinnassa olevat molekyylit voivat liikkua vapaammin kuin jään sisällä olevat molekyylit, ja jään pinnassa olevien vesimolekyylien käytös onkin melkein vastaavaa kuin nestemäisessä tilassa olevien vesimolekyylien käytös. Siksi jään pintakerroksen ominaisuudet eivät ole samanlaiset kuin jään ominaisuudet yleensä, vaan ominaisuudet ovat pikemminkin jotain jään ja nestemäisen veden ominaisuuksien väliltä. (Oksanen 1999.)

Kahden kiinteän kappaleen välinen sidoslujuus riippuu kontaktikappaleiden materiaaliominaisuuksista. Useimmissa tapauksissa kahden kiinteän kappaleen välinen adheesiosidos on vahvempi kuin heikomman materiaalin koheesiovoimat. Siksi mahdollinen murtuma tapahtuu lähes poikkeuksetta heikomman materiaalin sisällä, ei kappaleiden liitoskohdassa. (Buckley 1981.)

Materiaalin pintaenergian avulla saadaan tietoa materiaalin koheesiosidoksista. Mitä suurempi materiaalin pintaenergian arvo on, sitä vahvempia ovat materiaalin koheesiosidokset. Pintaenergian arvo voidaan yksinkertaisimmillaan laskea Gilmanin kaavan avulla (Buckley 1981):

$$\gamma = (E/\gamma_o)(a_o/\pi)^2 \quad (2.3)$$

missä

a_o on vetovoimien etäisyys (*range or elastic distance of the attractive forces*)

E on kimmomoduuli

γ_o on hilavakio (*equilibrium lattice constant perpendicular to plane*)

γ on pintaenergia

Kaavasta 2.3 nähdään, että pintaenergia on suoraan verrannollinen aineen kimmomoduuliin. Koska materiaalin koheesiolujuus on riippuvainen pintaenergian arvosta, koheesiolujuus riippuu myös aineen kimmomoduulista. Materiaalin sisäinen jäykkyys eli kimmomoduuli antaa siis tietoa aineen koheesiolujuudesta eli aineen sisällä olevien molekyylien välisestä sidoslujudesta.

Materiaalin pintaenergia vaikuttaa myös adheesiolujuuden arvoon. Mitä suurempi materiaalin pintaenergian arvo on, sitä suurempi on myös jään adheesiolujuus kyseiseen materiaaliin. (Javan-Mashmool 2005.)

2.5.2 Adheesiovoimat

Adheesiosidos muodostuu aina kahden erillisen kappaleen rajapinnalle. Kun kaksi kiinteää kappaletta tuodaan lähietäisyydelle toisistaan, niiden pintojen välille voi muodostua adheesiivinen sidos. Sidoksen lujuus riippuu toisiinsa kiinnittyneiden kappaleiden materiaaleista sekä pintojen laadusta ja puhtaudesta. Jään adheesiolujuuden ymmärtämiseksi on hyvä ensin selvittää, millaiset molekyylisidokset jään ja kiinteän kappaleen välillä vaikuttavat.

Jään adheesiossa vaikuttavat kolme mekanismia: kovalenttinen tai kemiallinen sidos, dispersio- tai van der Waals -voimat ja suora elektrostaattinen vuorovaikutus (Ryzhkin & Petrenko 1997). Mekanismien vaikutuksen osuus riippuu siitä, mihin materiaaliin jää kiinnittyy. Tutkimuksissa (Wilen et al. 1995, Petrenkon & Qin 1999 mukaan) on todettu, että jään ja teräksen välisessä adheesiossa Lifshitz–van der Waals -voimat eivät ole merkittäviä. Toisaalta on myös esitetty, että tärkein adheesio-mekanismi jään ja kiinteän kappaleen välillä olisi useissa tapauksissa elektrostaattinen vuorovaikutus (Ryzhkin & Petrenko 1997).

Jään adheesiolujuudesta puhuttaessa tarkoitetaan yleensä jään adheesiivista leikkauslujuutta. Jään adheesiivisesta leikkauslujuudesta on tehty lukuisia tutkimuksia, joissa on testattu jään kiinnittymislujuutta eri materiaaleihin. Jäällä on myös adheesiivinen vetolujuus, mutta sen mittaaminen on erittäin hankalaa. Yleensä adheesiivista vetolujuutta mittaessa tuloksena on jään koheesioaurio adheesioaurion sijaan. On kuitenkin arvioi-

tu, että jään adhesiivinen leikkauslujuus on 15 kertaa pienempi kuin adhesiivinen vetolujuus. Ero johtuu todennäköisesti nestemäisestä kerroksesta jään ja kiinteän kappaleen välillä. Vedossa pintajännitys pitää kappaleet yhdessä, kun taas leikkauksessa vain kitkavoimat pitävät kappaleita yhdessä. Kitkavoimat ovat suuruudeltaan paljon pintajännitysvoimia pienempiä. (Jellinek 1960.)

Yleensä jään adheesiolujuus teräkseen on suurempi kuin jäämolekyylien väliset koheesiovoimat. Tämä johtaa siihen, että jää ei irtoa teräksen ja jään liitoskohdasta vaan murtuu. Toisaalta kun ollaan tarpeeksi lähellä jään sulamispistettä, koheesiolujuus voi ylittää adheesiolujuuden, jolloin jää voi irrota myös jään ja metallin liitoskohdasta. Tämäkin selittyy jään ja teräksen rajapinnalla olevalla nesteen kaltaisella kerroksella, jonka johdosta jään adheesiolujuus pienenee lämpötilan kasvaessa. (Andrews & Lockington 1983.)

Taulukossa 2.2 nähdään useita eri tutkimustuloksia jään ja teräksen väliselle adhesiiviselle leikkauslujuudelle.

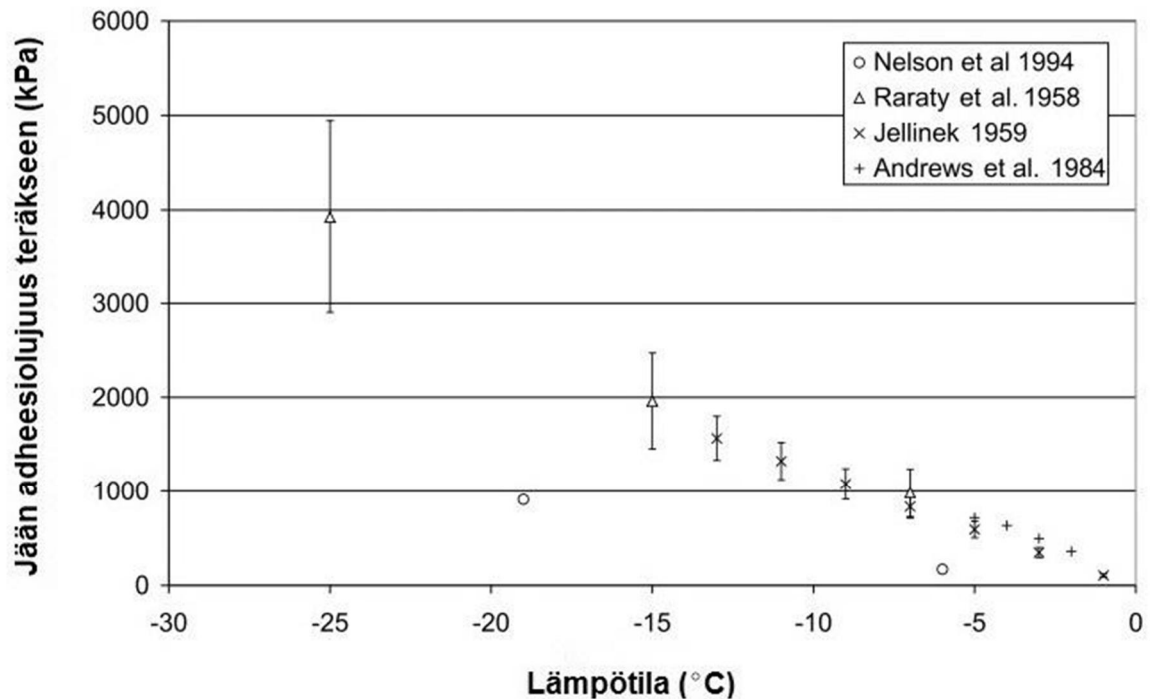
Taulukko 2.2. Jään adheesiolujuus teräkseen eri tutkimustulosten mukaan.

Jään adheesiolujuus τ teräkseen (MPa)	Mittauslämpötila T (°C)	Lähde
0,698	−10	Meuler et al. 2010
0,5	−10	US Army Corps of Engineers 2003
0,1–0,4	-	Holtinen et al. 1998
0,17–0,91	−6...−19	Nelson & Young 1994 Sep- pingsin 2005 mukaan
0,3–0,55	−2...−40	Makkonen 1994
0,4–0,8	0...−5	Andrews et al. 1984 Seppingsin 2005 mukaan
0,67–0,99	−10	Oksanen 1982
0,068–0,61	−4,5	Jellinek 1960
0,1–1,8	0...−13	Jellinek 1959 Seppingsin 2005 mukaan
0,8–5	−7...−25	Raraty et al. 1958 Seppingsin 2005 mukaan

Samanlaisilla mittausjärjestelyillä saatetaan saada hyvinkin erilaisia tuloksia jään adheesiovoimille. Tuloksiin vaikuttavat aina jäätyneen materiaalin pinnan karheus, pinnan

puhtaus, lämpötila sekä jään rakenne. (Seppings 2005.) Taulukossa 2.2 on esitetty jään adheesiolujuuden lisäksi myös lämpötila, jossa mittaukset on suoritettu. Mittaukset, jotka on suoritettu muuten samoissa olosuhteissa lämpötilaa vaihdellen, vahvistavat jään adheesiolujuuden riippuvuuden lämpötilasta. Näistä tuloksista ei käy ilmi pinnan karheuden vaikutus adheesiolujuuteen. On kuitenkin todettu (Zou et al. 2010), että materiaalin pinnan karheuden lisääminen kasvattaa jään adheesiolujuutta kyseiseen materiaaliin.

Kuvassa 2.13 on esitetty useiden tutkijoiden tulokset jään adheesiolujuuden vaihteluvälille eri lämpötiloissa. Siitä käy hyvin ilmi jään adheesiolujuuden riippuvuus lämpötilasta. Alhaisessa lämpötilassa adheesiolujuus on selvästi suurempi kuin nollan asteen tuntumassa.

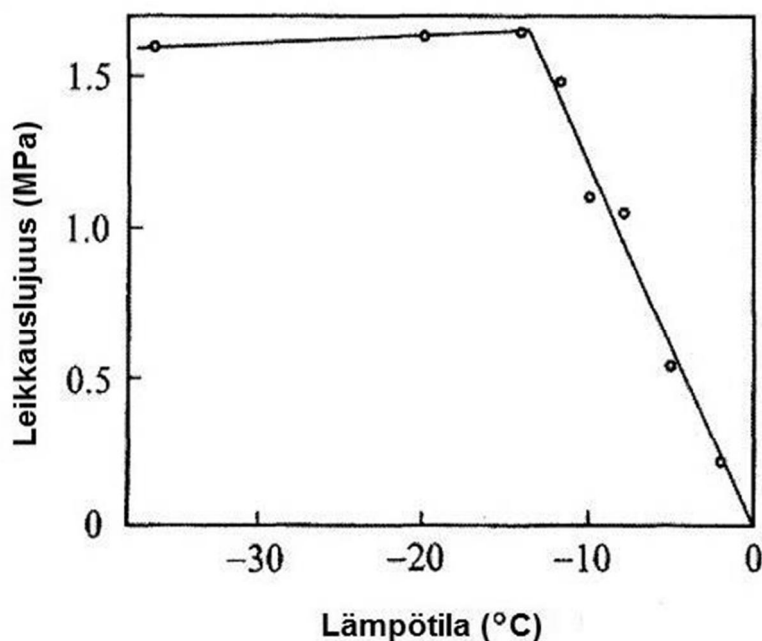


Kuva 2.13. Jään adheesio teräkseen eri lämpötiloissa (Seppings 2005).

Kuvassa 2.14 on edelleen kuvattu teräspinnalle jäätyneen jään adhesiivisen leikkauslujuuden riippuvuutta lämpötilasta. Adheesiolujuus pysyy alhaisilla lämpötilan arvoilla suunnilleen vakiona. Lämpötilan noustessa adheesiolujuus on kääntäen verrannollinen lämpötilaan, eli lämpötilan kasvaessa adheesiolujuus pienenee. Kuva 2.14 vastaa etenkin korkeammilla lämpötilan arvoilla hyvin kuvaa 2.13.

Kuva 2.14 on koottu useista mittaustuloksista (Jellinek 1958, 1959 & 1962), joissa on tarkasteltu puhtaalle teräspinnalle jäätyneen lumijään leikkauslujuutta. Näissä tutkimuksissa yli -13 °C:n lämpötiloissa hajoaminen tapahtui adhesiivisesti, kun alle -13 °C:n lämpötiloissa murtuminen tapahtui koheesion kautta, eli jään sisällä. (Hobbs 1974.) Myöhemmin tehdyissä tutkimuksissa jään koheesiolujuus on osoittautunut lähes

poikkeuksetta alhaisemmaksi kuin jään adheesiolujuus teräkseen, ja hajoaminen on tapahtunut adhesiivisesti vain jään sulamispisteen lähellä. (Andrews & Lockington 1983.)



Kuva 2.14. Jään ja teräksen välisen adhesiivisen leikkauslujuuden riippuvuus lämpötilasta (Javan-Mashmool 2005).

Adheesiolujuutta kasvattavat jään suolapitoisuuden aleneminen, lämpötilan laskeminen tai kuormitusnopeuden kasvattaminen (Holtinen et al. 1998). Toisaalta myös materiaalin pinnan karheuden lisääminen kasvattaa jään adheesiota materiaaliin, sillä jää tarttuu paremmin kiinni karheaan pintaan (Seppings 2005).

Periaatteessa jään irrottamiseksi tarvittava voima on kaavan 2.4 mukaisesti

$$F = \tau_a * A_j \quad (2.4)$$

missä

F on adheesion irtoamiseen tarvittava voima

τ_a on jään adhesiivinen leikkauslujuus

A_j on pinta-ala, jolla jää on kiinnittynyt metalliin

Käytännössä voimaa ei kuitenkaan tarvita näin paljon. Adheesio nimittäin irtoaa progressiivisesti alkaen eniten rasitetusta kohdasta ilman, että täysi adheesiolujuus vaikuttaisi koko kosketuspinnalla samanaikaisesti (Holtinen et al. 1998).

Adheesion irtoaminen muistuttaa asteittain tapahtuvaa murtumista. Kun adheesiolujuus eniten rasitetussa kohdassa on ylitetty, jään ja materiaalin väliin muodostuu särö. Tämän jälkeen säröjä alkaa muodostua lisää, ja lopulta jää irtoaa materiaalista kokonaan. (Seppings 2005.)

3 VAIHTEIDEN LUMIONGELMAT

Rautatievaihteen toiminta voi estyä, mikäli vaihteen kielen ja tukikiskon väliin kulkeutuu paljon lunta. Lunta voi kertyä vaihteeseen lumisateen aikana tai kulkeutumalla tuulen mukana. Toisaalta myös vaihteen yli kulkevasta junasta voi pudota lunta ja jäätä vaihteeseen.

3.1 Lumen kertyminen junan alustaan ja vaihteisiin

Lumi kertyy vaunuissa pääasiassa teliin ja alustarakenteisiin (kuva 3.1). Kerääntynyt lumi voi muuttua jääksi joko lämpötila- tai painemuutosten johdosta. Painemuutoksia voi aiheuttaa lumen jääminen puristuksiin liikkuvien osien väliin.



Kuva 3.1. Lähiliikennejunan alustarakenteisiin kertynyttä lunta (Liikennevirasto 2010).

Tiiviiksi pakkautunut lumi vaikeuttaa telin liikkumista ja vaikuttaa myös muiden vaunurungon alapuolella sijaitsevien komponenttien toimintaan. Vaunurungon alapuolelle kerääntynyt lumi ja jää voi haitata komponenttien liikeratoja ja vahingoittaa komponentteja. Lisäksi suuri määrä lunta tai jäätä hankaloittaa selvästi vaunujen huoltoa, sillä huollon täytyy tällöin odottaa vaunujen sulatusta ennen tarvittavien toimenpiteiden tekemistä. Lumen jäätyminen rakenteisiin voi aiheuttaa häiriöitä myös jarrujen toiminnassa, mikä turvallisuussyistä johtaa alhaisempien nopeuksien käyttöön raideliikenteessä. Talviolosuhteet ja lumen sekä kosteuden kerääntyminen junavaunuun aiheuttavat myös lukuisia muita ongelmia vaunun eri osille. Niitä ei kuitenkaan tässä käsitellä tarkemmin. (Liikennevirasto 2010.)

Junien alustarakenteisiin voi kerääntyä ja jäättyä tonneittain lunta, jolloin yhden junayksikön sulatus kestää jopa 12 tuntia. Jos kalustoa ei kuivata, pinnalle jäänyt vesi voi muuttua jääksi ja edesauttaa lumen kerääntymistä. Osa kalustosta on lisäksi erityisen herkkää kosteudelle ja edellyttää sulatuksen lisäksi huolellista kuivatusta, jolloin junayksikkö voi joutua olemaan poissa liikenteestä jopa kaksi vuorokautta. Pahimmissa talviolosuhteissa viivästymisiä aiheuttavat siis kaluston kannalta sekä junien sulattamiseen vaadittava aika että junien alennetut ajonopeudet. (Liikennevirasto 2010.)

Kaluston ongelmat heijastuvat myös rataverkon toimivuuteen. Junan alustarakenteista voi pudota lunta tai jäätä rautatievaihteeseen, jolloin vaihteen toiminta häiriintyy. Vaihteessa oleva epäjatkuvuuskohta aiheuttaa vaihteen yli kulkevaan junaan herätteen, jonka johdosta lunta irtoaa junasta usein juuri vaihteen kohdalla. Toisaalta lumi voi irrota kalustosta myös jarruttamisen aiheuttaman lämmön vaikutuksesta. Tällöin lunta irta-aa usein asemien läheisyydessä junan pysähtyessä. Junakalustosta lunta voi pudota hetkessä suuria määriä, tutkimuksen mukaan jopa kymmeniä kiloja kerralla (Railway Technical Research Institute 2004). Tämän vuoksi juuri kalustosta irtoava lumi on vaihteen kunnossapidon kannalta ongelmallista.

Lunta voi kerääntyä vaihteisiin myös lumisateena tai kulkeutumalla vaihteeseen tuulen mukana (kuva 3.2). Tuulen mukana kulkeutuva lumi on yleensä vaihteiden toiminnan kannalta hankalampaa kuin satava lumi, sillä se kasautuu korkeiksi kinoksiksi raiteisiin. Lisäksi tuulen mukana kulkeva lumi pakkautuu raiteen tarjoaman esteen kohdalla tiiviimmäksi ja kimmoisammaksi, ja siten sen poistaminen raiteilta vaikeutuu.



Kuva 3.2. Keravan vaihde V651 lumisateen jälkeen 2.4.2012.

Vaihteen kohdalle vaihteen kielen ja raiteen väliin pakkautunut lumi tai yli kulkevasta junasta irronnut jääkimpale estää vaihteen liikkumisen ja aiheuttaa siten toimintahäiriöitä vaihteeseen. Toisaalta myös vaihteen ulkopuolelle pakkautuneesta ja tiivisty-

neestä lumimassasta voi irrota kovia lumipalasia, jotka voivat tuulen tai junan ilmavirran avulla kulkeutua vaihteen kielen ja tukikiskon väliin.

3.2 Lumen irtoaminen junan alustasta

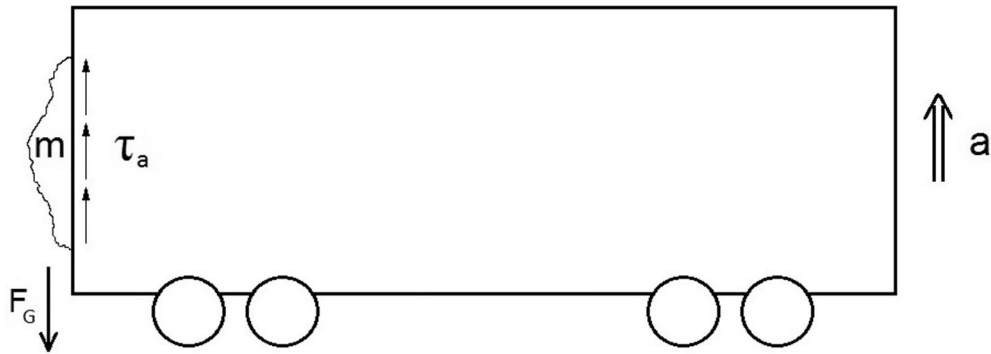
Nykyään käytössä olevat jatkuvaksi hitsatut kiskot eivät yleensä aiheuta suuria värähtelyjä kalustoon vaihdealueen ulkopuolella. Tämän vuoksi vaihteen epäjatkuvuuskohdan aiheuttama heräte aiheuttaa lumen ja jään putoamisen usein juuri vaihdealueelle. Esimerkki vaihteen epäjatkuvuuskohdasta on kuvassa 3.3.



Kuva 3.3. Rautatievaihde V001 Madesjärvellä.

Vaihteen aiheuttaman herätteen suuruus riippuu oletettavasti vaihteen tyypistä, radan rakenteesta sekä yli ajavan junan tyypistä, nopeudesta ja ajosuunnasta. Myös sillä on merkitystä, ajaako juna vaihteesta suoraan vai poikkeavalle raiteelle. Heräte aiheuttaa kalustoon kiihtyvyyden, jonka johdosta kalustoon kerääntynyt lumi voi irrota. Toisaalta heräte voi aiheuttaa myös taipumia junarunkoon, jolloin junaan kerääntynyt lumi voi murtua ja siten irrota junasta.

Lumi on kiinnittynyt teräkseen adheesiovoimilla (luku 2.5). Lumen adhesiiviseksi irtoamiseksi tarvittava kiihtyvyys voidaan yksinkertaistettuna laskea junaan kiinnittyneen lumimassan tasapainoyhtälöstä (kuva 3.4). Kuvan 3.4 esimerkissä lumi on kiinnittynyt vaunun pätyyn, jolloin lumen irtoamista tarkastellaan adhesiivisen leikkauslujuuden ja vaunun pystysuuntaisen kiihtyvyyden avulla. Jos lumi olisi kiinnittynyt vaunun pohjaan, laskennassa käytettäisiin adhesiivisen leikkauslujuuden lisäksi vaunun vaakasuuntaista ja radansuuntaista kiihtyvyyttä.



Kuva 3.4. Junavaunuun kiinnittyneen lumen vapaakappalekuva.

Voima F_G toteuttaa yhtälön $F_G = mg$, jolloin tasapainoyhtälöksi saadaan

$$\sum F = \tau_a A - mg = ma \quad (3.1)$$

missä

- τ_a on lumen tai jään adhesiivinen leikkauslujuus
- A on ala, jolla lumimassa on kiinnittynyt junavaunuun
- m on junavaunuun kiinnittyneen lumen massa
- a on lumimassaan kohdistuva kiihtyvyys

Kaavasta (3.1) voidaan laskea lumen irrottamiseen tarvittava kiihtyvyys a :

$$a = \frac{\tau_a A - mg}{m} \quad (3.2)$$

Epäjatkuvuuskohdan aiheuttama heräte voi myös aiheuttaa junarunkoon taipumia, jolloin kiinnittynyt lumi tai jää saattaa murtua ja sen myötä irrota junasta. Jään murtolujuus taivutuksen suhteen on melko pieni, vain noin 0,5 MPa, ja lumen murtolujuus on vielä pienempi. Lumi ja jää murtuvat siis kohtuullisen helposti. Taivutusjännityksellä on ääriarvo kappaleen poikkileikkauksen ylä- ja alareunassa. Jännitys voidaan laskea kaavalla 3.3

$$\sigma_x = \frac{M_t}{I_z} y \quad (3.3)$$

missä

- σ_x on taivutusjännitys
- M_t on taivutusmomentti
- I_z on neliömomentti z :n suhteen
- y on etäisyys y -akselin suunnassa poikkileikkauksen pintakeskiöstä
- R_m on murtolujuus

Kaavasta 3.3 voidaan laskea, kuinka suuri taivutusmomentti materiaalin murtamiseen tarvitaan. Lumi tai jää murtuu, kun jännityksen maksimiarvo ylittää murtorajan:

$$M_t = \frac{R_m I_z}{y} \quad (3.4)$$

Taipuma on suoraan verrannollinen taivutusmomenttiin ja kääntäen verrannollinen materiaalin kimmomoduuliin. Vaunurungon taipumista voidaan päätellä vaikuttava taivutusmomentti ja sitä kautta saadaan selville lumeen tai jäähän kohdistuvat jännitykset.

Toisaalta jännitykset voidaan päätellä myös taipuman säteen ρ avulla kaavan 3.5 mukaisesti:

$$\sigma_x = E \frac{y}{\rho} \quad (3.5)$$

Lumen tai jään murtamiseksi taipuman säteen tulisi siis olla kaavan 3.6 mukaisesti:

$$\rho = E \frac{y}{R_m} \quad (3.6)$$

Esimerkiksi jään arvoilla $E = 9$ GPa, $R_m = 0,5$ MPa ja $y = 25$ mm saataisiin vaadittavaksi taipuman säteeksi 450 m.

3.3 Vaihteiden lumiongelmiin vaikuttavat sääolosuhteet

Vaihteiden lumiongelmiä aiheuttavat lähinnä lumisade, tuulen mukana kulkeutuva lumi sekä junakalustosta irtoava lumi. Tuulen mukana kulkeutuva lumi on ongelmallisempaa kuin satava lumi, sillä se voi pakkautua vaihteeseen tiheäksi kinokseksi. Tuulen nopeudesta riippuen lumi kulkeutuu eri tavoin, mutta jo 4,5 m/s puhaltava tuuli pystyy irrottamaan lumikiteitä lumipeitteestä (Oksanen 1999). Vastasatanut lumi irtoaa lumipeitteestä helpoiten. Kulkeutuessaan tuulen mukana maassa lumihuukkaset menettävät alkuperäistä muotoaan mekaanisen metamorfoosin kautta. Lumikiteet kykenevät tällöin pakkautumaan tiiviimmin ja saavuttamaan tuulen nopeudesta riippuen tiheyksiä välillä 100–400 kg/m³ (Seligman 1936, Oksanen 1999 mukaan). Lumen tiheyden kasvaessa sen lujuusominaisuudet paranevat ja lumi muuttuu kimmoisammaksi ja kovemmaksi. Lujaa, tiiviiksi pakkautunutta lunta on vaikeampi poistaa rautatievaihteesta. Tiiviiksi pakkautunut lumi aiheuttaa myös todennäköisemmin vaihteen toimimattomuuden, sillä tiheä lumi estää vaihteen liikettä tehokkaammin kuin vastasatanut, kevyt lumi. Toisaalta myös vaihteen liike itsessään aiheuttaa lumen pakkautumista tiiviimmäksi. Monissa vaihteissa on käytössä lämmitysjärjestelmä, mutta lämmitys ei yksinään riitä tiiviiksi pakkautuneen lumen poistamiseen (luku 3.4.1).

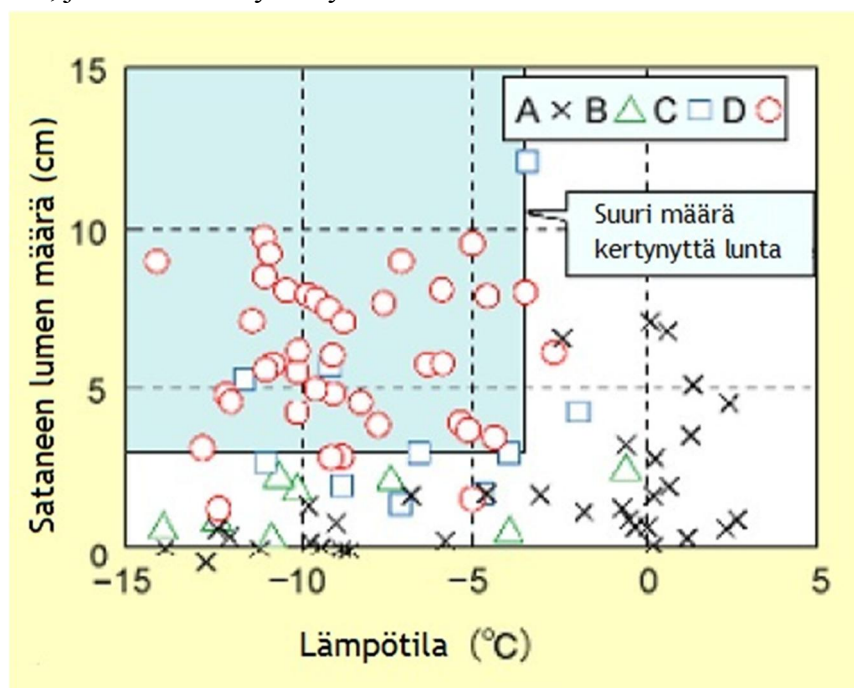
Vaihteiden toimintahäiriöitä voi aiheuttaa myös vaihteesta kulkeneen junan alustarakenteista pudonnut lumi. Lumen kerääntymisessä junan alustarakenteisiin on havaittu kaksi erityisen epäedullista sääolosuhdetta. Toinen on pöllyävän ja kuivan lumen esiintyminen. Kuiva lumi on kevyttä ja hyvin hienojakoista, ja kulkeutuu siksi helposti junan virtausten mukana. Pöllyävä lumi pakkautuu junan teliin ja alustarakenteisiin ja rajoittaa siten telin liikettä. (Kloow & Jenstav 2006.)

Toinen vaikea olosuhde on lämpötilan vaihtelevuus nollan asteen molemmin puolin. Kun lämpötila nousee nollan asteen yläpuolelle, junaan kertynyt lumi sulaa. Lämpötilan laskiessa nollan asteen alapuolelle, sulanut lumi jäätyy. Näin junaan alkaa muodostua jäätä, joka toimii kantavampana alustana edelleen kertyvälle lumelle. Lämpötilan vaihtelu voi johtua esimerkiksi junan kulkemisesta lämpoisemmän alueen poikki tai junan pysähtymisestä, jolloin muun muassa jarruista tuleva lämpö sulattaa lunta. Esimerkiksi tunneleissa on usein lämpimämpää kuin ulkoilmassa, joten pitkien tunneleiden kohdalla lumi voi ehtiä sulamaan. (Kloow & Jenstav 2006.)

Nämä olosuhteet ovat yleisesti ottaen vaikeimpia junan toiminnan kannalta. Esimerkiksi pelkkä pakkanen tai kova tuuli eivät yleensä aiheuta ongelmia rautatieliikenteessä, mutta yhdistettynä muihin talvisiin sääolosuhteisiin, kuten esimerkiksi lumisateeseen, ne voivat olla hyvinkin haitallisia. (Kloow & Jenstav 2006.)

Junan alustarakenteisiin pakkautunut lumi ja jää rajoittavat junan telin liikeratoja ja vahingoittavat junan alustarakenteissa sijaitsevia komponentteja, mutta aiheuttavat myös haittaa vaihteissa. Jos junaan on kertynyt paljon lunta ja jäätä, sitä voi myös irrota junasta suuria määriä kerralla. Lämpötilan vaihtelu nollan asteen molemmin puolin lisää lumen irtoamisen riskiä, sillä nollan asteen tuntumassa lumi ja jää on heikommin kiinnittynyt junan alustaan (luku 2.5). Tällöin vaihteen aiheuttama heräte aiheuttaa todennäköisemmin lumen tai jään irtoamisen junan alustasta. Erityisesti jää voi kiinnittyä junan alustaan todella lujasti, joten jään irtoaminen kovalla pakkasella on hyvin epätoivottavaa.

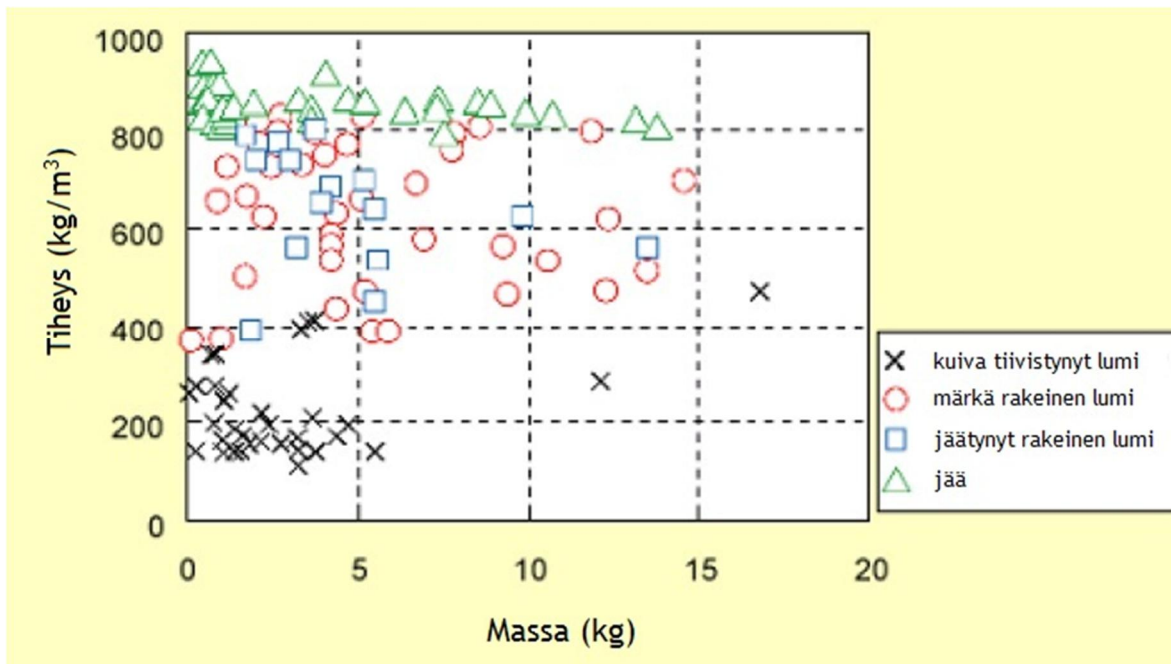
Tutkimukset Japanissa (Railway Technical Research Institute 2004) ovat osoittaneet, että lämpötilan ollessa $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ tai alle ja päivittäisen lumisateen määrän ylittäessä 30 mm, lunta ja jäätä kertyy junan alustaan runsaimmin. Tämä nähdään myös kuvasta 3.5, jossa on esitetty kertyneen lumen määrä eri sääolosuhteissa.



Kuva 3.5. Kertyneen lumen määrä eri lämpötiloissa (Kloow & Jenstav 2006).

Kuvassa 3.5 kertyneen lumen ja jään määrä on lajiteltu neljään eri ryhmään, joista $A < B < C < D$. Ryhmässä D lunta on kertynyt junan alustaan eniten. Tässä ryhmässä lämpötila on ollut keskimäärin -4 °C alapuolella ja päivittäinen lumisateen määrä on yleensä ylittänyt 30 mm.

Samassa tutkimuksessa tarkasteltiin junan alustaan kertyneen lumen ja jään massaa ja tiheyttä. Kuvassa 3.6 on esitetty kertyneen lumen massan ja tiheyden yhteys eri lumityypeillä.



Kuva 3.6. Kertyneen lumen massan ja tiheyden yhteys eri lumityypeillä (Kloow & Jentav 2006).

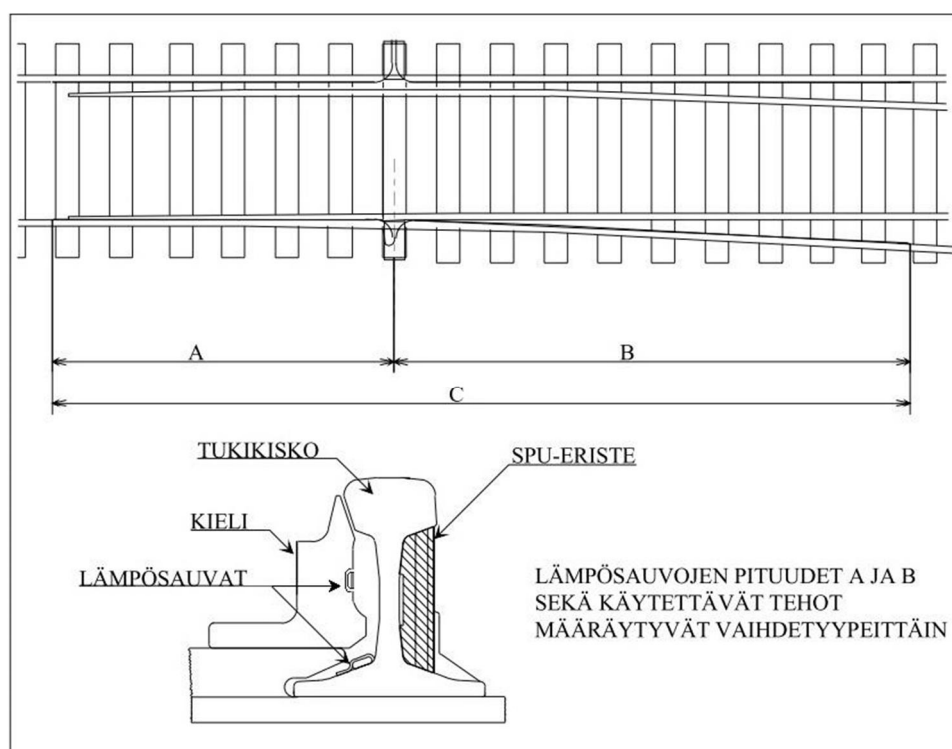
Kuvasta 3.6 huomataan, että junan alustaan kertyneen lumen ja jään tiheys vaihtelee välillä $150\text{--}900\text{ kg/m}^3$. Jään tapauksessa tiheys on lähellä 900 kg/m^3 . Suurin lumimassa, joka tutkimuksen (Railway Technical Research Institute 2004) mukaan voi pudota yhtenäisenä junan alustasta, painaa noin 15 kg. Jos tällaisen 15 kg painavan lumimassan tiheys on 500 kg/m^3 , on lumimassan tilavuus tällöin $0,03\text{ m}^3$. Lunta voi siis pudota junan alustasta hyvinkin suuria määriä kerralla.

3.4 Lumen poisto vaihteista

Vaihteiden toimintahäiriöt kuuluvat talvella yleisimpiin ongelmatekijöihin raideliikenteessä. Usein häiriöt johtuvat lumen kerääntymisestä vaihteen kielen ja tukikiskon väliin, jolloin vaihde ei pääse liikkumaan halutulla tavalla. Lumen kerääntymistä voidaan yrittää estää tai lunta voidaan poistaa vaihdealueelta erilaisilla menetelmillä. Erityisen tärkeää on saada lumi poistettua vaihteen kielen ja tukikiskon välistä.

3.4.1 Lämmitys

Suomessa yli puolessa rataverkon vaihteista on käytössä vaihteiden lämmitysjärjestelmä. Kiskoja lämmitetään vastuksilla, jotka saavat sähkönsä yleensä suoraan ratajohdosta vaihteenlämmitysmuuntajan avulla. Lämpösauvat asennetaan kuvan 3.7 mukaisesti tukikiskon jalan yläosaan kielen puolelle ja usein myös kieleen koneistettuun uraan. Osa lämmöstä siirtyy tukikiskoon johtumalla, ja osa siirtyy tukikiskon ja vaihteen kielen väliin säteilemällä. Tukikiskon ulkopuolelle asennettavat lämpöeristeet pienentävät lämpöä haihduttavaa pinta-alaa. (Ratahallintokeskus 2000.)



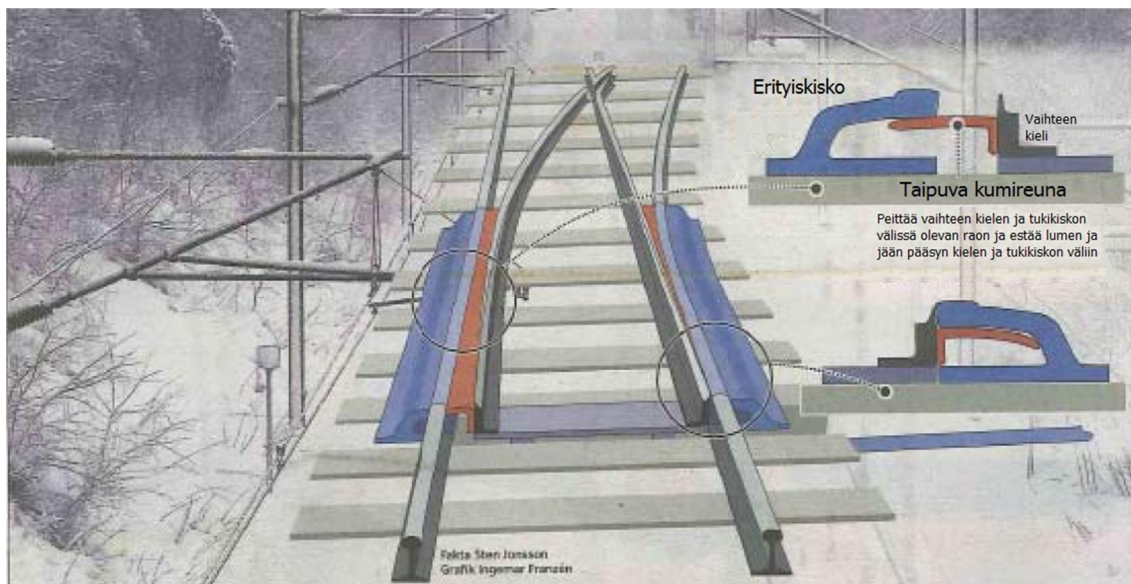
Kuva 3.7. Lumensulatuslaitteet (muokattuna lähteestä Ratahallintokeskus 2000).

Lämmitys ei yksinään ole toimiva ratkaisu lumen poistamiseksi vaihteista, sillä jatkuva lämmitys aiheuttaa kiskon pintaan kosteutta, joka nimenomaan kerää kulkeutuvaa lunta. Lumen kulkeutumista vaihteeseen tulisikin rajoittaa vaihteenlämmityksen yhteydessä esimerkiksi lumiaitojen tai lumenohjaimien avulla. Lisäksi lämmityksen käyttöä tulee rajoittaa vain tarpeellisiin tilanteisiin. Lämmitys ei myöskään pysty yksinään puhdistamaan vaihdetta kovalla lumisateella. Vaihteen puhdistamiseen tarvitaan tällöin myös harjausta. Vaihteen toiminnan varmistamiseksi olisi suositeltavaa puhdistaa koko vaihde lumesta, ja tämän lisäksi vielä noin 20 metrin matkalta vaihteen molemmin puolin. (Kloow & Jenstav 2006.)

Lämmitys ei auta myöskään junasta vaihteen kielen ja kiskon väliin pudonneiden jääpalasten tapauksessa. Jääpala on vain pieneltä osalta kiinni lämmitetyssä kiskossa, joten sen sulaminen kestää pitkään. Tämän vuoksi jääpalasten poisto mekaanisesti vaihteen kielen ja kiskon välistä on tarpeellista. (Kloow & Jenstav 2006.)

3.4.2 Vaihteen kielen suojaruuna

Yksi ratkaisu rautatievaihteiden talviongelmien on estää lumen ja jään pääsy vaihteen kielen ja tukikiskon väliin. Tämä voisi onnistua joustavan suojaruunan avulla, joka tulisi esiin aina vaihteen kielen ollessa auki. Suojaruuna siirtyy kiskoprofiilin alle vaihteen ollessa kiinni (kuva 3.8).



Kuva 3.8. Vaihteen joustava suojaruuna, joka siirtyy kiskoprofiilin alle vaihteen kielen ollessa kiinni (Idéus konsultteknik HB 2010, Kloowin 2011 mukaan).

Kuvan 3.8 mukainen ratkaisu on kehitteillä Ruotsissa. Suojaruunan on tarkoitus estää yli kulkevasta junasta irtoavan lumen ja jään päätyminen vaihteen kielen ja tukikiskon väliin. Toisaalta suoja myös helpottaa vaihteen mekaanista puhdistamista harjalla, sillä vaihteen kielen ja tukikiskon välille ei jää hankalaa kapeaa rakoa. (Kloow 2011.) Kuvasta ei käy selvästi ilmi, miten tukikisko sijoittuu suojaruunan kohdalla.

3.4.3 Muut menetelmät

Mekaaninen poisto on varmin keino lumen poistoon vaihteista, mutta se vaatii paljon henkilöresursseja. Mekaaninen poisto tarkoittaa käytännössä lumen harjausta, lapiointia tai lumiharja- tai lumilinkotyökoneiden käyttöä. Ahtaalla ratapihalla mekaanisen poiston ongelma on lumen varastointipaikkojen riittämättömyys.

Paineilmalaitteita voidaan käyttää lumen poistoon esimerkiksi kannettavilla puhtaaksi-puhalluslaitteilla, kuten Tampereen alueella on tehty (Resiina-lehti 2008). Puhaltimia varten tarvittava paineilma kehitetään raiteiden välissä olevilla kompressoreilla.

Lumisuojat suojaavat vaihteen kääntö- ja tarkastustankoja lumelta ja jäältä. Suojien materiaalina on Suomessa käytössä vesivaneri, alumiini ja lujitemuovi (Ratahallintokeskus

2000). Suojat estävät lumen pakkautumisen niihin kohtiin, jotka ovat vaihteen toiminnan kannalta kriittisiä. Lumisuoijat kuitenkin hajoavat tai irtoavat helposti etenkin nopeista junista putoavan lumen ja jään ja junien aiheuttamien ilmavirtauksien seurauksena.

Lumiharjat on kehitetty ratkaisemaan lämmityksen yhteydessä ilmennyt pölyävän lumen tarttumisongelma. Lämmitys sulattaa lunta, ja pölyävä lumi tarttuu herkästi sulaneen kiskon kostealle pinnalle. Harjat kiinnitetään kuvan 3.9 mukaisesti ratapölkkyihin kiskon suuntaisesti, ja ne vähentävät pölyävän lumen pääsyä vaihteen kielen ja tukikiskon väliin. (Smith 2010.)



Kuva 3.9. Lumiharja (Kloow & Jenstav 2006).

Lumispoilerit sijoitetaan kiskon suuntaisesti vaihteen kielen kohdalle. Kumista valmistetun spoilerin yläreuna on noin 100 mm kiskon selän yläpuolella, sillä spoilerin tarkoituksena on nostaa pölyävää lunta ylöspäin. Tämän ansiosta pölyävä lumi ei laskeudu vaihteen kielen ja tukikiskon väliin. (Kloow & Jenstav 2006.)

Lumen sulatusvaunu on suunniteltu ahtaille ratapihoille, joissa ei ole tilaa lumen aaraimiseen ja säilytykseen. Lumi kerätään raiteelta ja siirretään sulatusvaunuun, jonka jälkeen sulanut lumi voidaan valuttaa viemäriin tai imeytyskenttään. Vaunun vaatima lämmitysteho on suuri. (Salmenperä & Nurmikolu 2012.)

3.5 Menetelmät lumen kerääntymisen ehkäisemiseksi

Jään kerääntymistä junan teliin ja alusrakenteisiin kannattaa vähentää mahdollisimman paljon. Yleisesti ottaen pyöreät pinnat ja matalakitkaiset pinnat ovat suositeltavia, sillä ne keräävät vähemmän lunta ja jäätä. Tasaisia pintoja, jotka liikkuvat toisiaan kohti, tulisi välttää. Tällaisissa väleissä lumi pakkautuu helposti tiiviimmäksi. (Kloow & Jenstav 2006.)

3.5.1 Jäänestoaineet

Jäänestoaineet laskevat nesteen jäätymispistettä ja estävät siten jään muodostumisen nesteeseen. Aineet ehkäisevät jään kerääntymistä junan rakenteisiin ja nopeuttavat jo muodostuneen jään irtoamista kalustosta. Jäänestoaineena käytetään pohjoismaissa propyleeniglykolia. Propyleeniglykolin jäätymispiste on $-59\text{ }^{\circ}\text{C}$, joten sen sekoittaminen veteen laskee veden jäätymispistettä huomattavasti nollan asteen alapuolelle.

Talvella 2009–2010 juniin kertyneen jään sulatukseen käytettiin Suomessa vesisulatasta kuumalla vedellä, sillä kalusto piti saada nopeasti sulatettua ja uudelleen käyttö-kuntoon. Tämä ei kuitenkaan ole toimiva ratkaisu pidemmällä aikavälillä, ja siksi tällöin syntyi ajatus glykolisulatuslaitteiston hankkimisesta Suomeen. (Liikennevirasto 2010.)

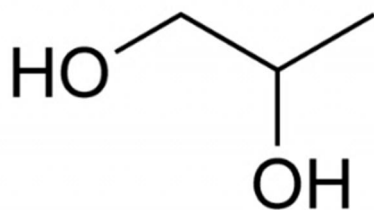
Vuonna 2010 Ilmalan varikolle Helsinkiin hankittiin glykolisulatuslaitteisto estämään lumen kiinnittymistä sekä jään muodostusta vaunujen alustoihin. Propyleeniglykoli-vesiliuosta ruiskutetaan junan alustaan ja valumat kerätään talteen valuma-altaisiin uudelleenkäyttöä varten (kuva 3.10). (VR Group 2011.)



Kuva 3.10. Ilmalan ratapihalla sijaitseva jäänestolaite ruiskuttaa jäänestoainetta junan alustaan (Ilta-Sanomat 2011).

Jäänestoaineiden käyttö on ajallisesti hyvin tehokasta, sillä yhden telin käsittely jäänestoaineella vie vain noin 40 sekuntia. Jäänestoaineet ovat myös kustannustehokkaita, sillä käytetystä jäänestoaineesta noin 90 % käytetään uudelleen. (Kloow & Jenstav 2006.)

Propyleeniglykoli (kuva 3.11) koostuu pyöreistä molekyyleistä, kun taas lumimolekyylit ovat teräväreunaisia. Tämän vuoksi lumi ei tartu helposti propyleeniglykoliin. Lisäksi on havaittu, että viskositeettinsa ansiosta propyleeniglykoli ei ajaudu yhtä helposti junan alustan pieniin nurkkiin kuin vesi. (Kloow & Jenstav 2006.)



Kuva 3.11. Propyleeniglykolin molekyyli rakenne.

Propyleeniglykoli on kuitenkin vesiliukoista, joten se irtoaa sateella helposti junan alustasta.

3.5.1 Muut menetelmät

Alustan ja telien kotelointiratkaisut estävät lumen kerääntymisen alustan rakenteisiin. Suojauksen tarkoituksena on myös vähentää alustaan iskeytyvästä sepelistä, lumesta ja jäästä syntyviä vaurioita. Kotelointi ei kuitenkaan estä kaasumaisen veden härmistymistä kuurajääksi alustassa. Kloowin ja Jenstavin (2006) mukaan koteloinnit voivat haitata lumen sulatusta huoltohalleissa ja toisaalta myös kerätä lunta tavallista enemmän, sillä suljetut rakenteet etenkin telissä keräävät lunta enemmän kuin avonaiset rakenteet.

Liikkuvia rakenteita voi myös suojata taipuisilla plekseillä, jolloin kertyvä jää putoaa pois pleksin muodonmuutoksien myötä.

Telien lämmityspotket asennetaan teleihin niihin kertyvän lumen ja jään sulattamiseksi. Putkissa kierrätetään sulatusvettä junan ollessa varikolla. Putket kohdennetaan telien kallistusjärjestelmien lämmittämiseen, sillä niiden toiminnassa on ollut talviaikaan ongelmia. (Alstom 2011.)

Jäätä hylkivät materiaalit ovat käytössä ilma- ja meriliikenteessä. Jäätä hylkivät materiaalit voivat olla erilaisia pinnoitteita, kuten maaleja. Pinnoitteen ja jään välinen adheesiolujuus on hyvin pieni, joten jää irtoaa itseksensä jääkerroksen kasvettua tarpeeksi suureksi. Jäätä hylkivän pinnoitteen ongelma on se, että se irtoaa ja huuhtoutuu pinnalta helposti pois. Viime aikoina on kuitenkin kehitetty uudenlaisia pinnoitteita, joiden pysyvyys on esitetty paremmaksi. Tällaiset pinnoitteet voivat tuoda uusia ratkaisukeinoja myös raideliikenteen lumi- ja jääongelmiin. (Salmenperä & Nurmikolu 2012.)

Jäänpoistokengät on yleisesti käytetty ratkaisu lentokoneiden siipien jääongelmissa. Jään poisto perustuu paineilman avulla muotoaan muuttaviin tuubeihin: muodonmuutos irrottaa suurimman osan tuubien päälle muodostuneesta lumesta ja jäästä. Kengät muodostuvat useista vierekkäin sijoitetuista tuubeista, ja ne voidaan muotoilla alustan mukaan. Jäänpoistokenkien huonoja puolia ovat korkea hinta ja paino. Lisäksi ne vahingoittuvat herkästi.

3.6 Menetelmät lumen irrottamiseksi kalustosta

Lunta ja jäätä kertyy junakalustoon jäänestomenetelmistä huolimatta. Lumiongelmien vähentämiseksi tulee huomioida myös ne menetelmät, joilla jo kertynyt lumi ja jää saataisiin irrotettua kalustosta.

Lunta ja jäätä putoaa vaihdealueelle vaihteen epäjatkuvuuskohdan aiheuttaman herätteen johdosta. Nyt tarkastellaan menetelmiä, joilla lumen ja jään saisi pudotettua hallitusti vaihdealueen ulkopuolella.

3.6.1 Raiteen epäjatkuvuuskohta

Vuonna 2011 testattiin kiskoon tehdyn epäjatkuvuuskohdan vaikutusta lumen ja jään irrottamiseen junakalustosta (Junnikkala & Untinen 2011). Kiskoon hiottiin suoralla raideosuudella kolme paria uria (kuva 3.12), ja tämän jälkeen tarkkailtiin lumen irtoamista urien yli ajaneista junista.



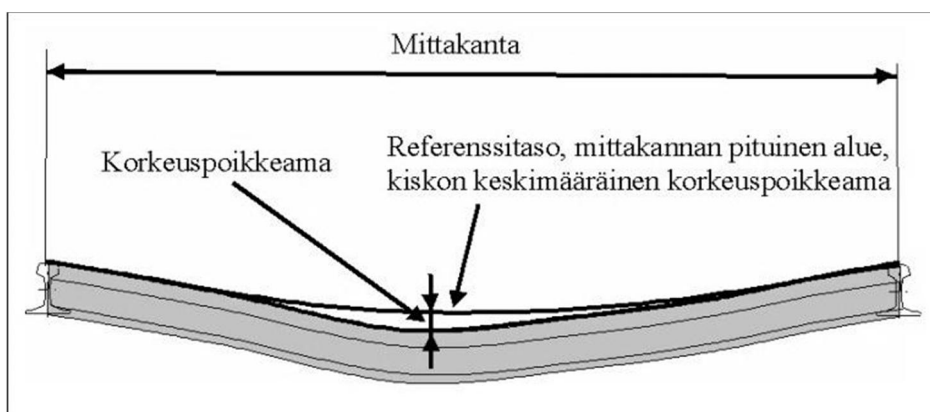
Kuva 3.12. Kiskoon hiottu ura (Junnikkala & Untinen 2011).

Kokeen aikana ei havaittu kaluston alustarakenteista irtoavan lunta tai jäätä urien aiheuttamien herätteiden takia. Mittauspaikka kuitenkin sijaitsi kahden vaihdealueen välissä, joten helpoiten irtoava lumi ja jää on todennäköisesti irronnut jo vaihdealueella ennen mittauspaikkaa. (Junnikkala & Untinen 2011.)

Ratateknisissä ohjeissa on tarkat määräykset kiskojen geometrian ja tasaisuuden suhteen. Ohjeista löytyvät esimerkiksi kiskon korkeuspoikkeamien, kierouden ja kallistuksen raja-arvot. Nämä määräykset vaikuttavat oleellisesti siihen, millaisia lumen irrotukseen tarkoitettuja epäjatkuvuuskohtia kiskoihin voidaan suunnitella. Mitattaville suureille on määritelty virheluokat eri kunnossapitotasolle (Ratahallintokeskus 2004). Virheluokat on jaoteltu virheen vakavuuden mukaan:

- C-luokan virhe on alkava virhe
- D-luokan virhe on sisällytettävä kunnossapitosuunnitelmaan ja korjattava lähitu-
levaisuudessa
- ★ – luokan virhe on välittömästi korjattava virhe

Korkeuspoikkeama on kiskon kulkupinnan korkeussuuntainen (z-suuntainen) poikkeama verrattuna keskimääräiseen kiskon korkeustasoon (kuva 3.13) (Ratahallintokeskus 2004).



Kuva 3.13. Korkeuspoikkeama (Ratahallintokeskus 2004).

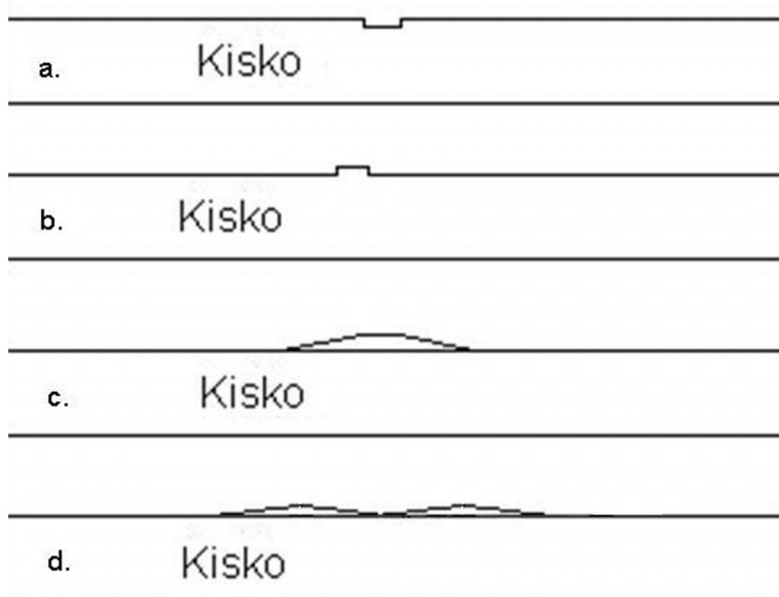
Taulukossa 3.1 on esitetty, millaisia korkeuspoikkeamia kiskossa sallitaan. Raja-arvot on esitetty 5 metrin tulostuskannalle.

Taulukko 3.1. Korkeuspoikkeamien raja-arvot [mm], tulostuskanta 5 metriä (Ratahallintokeskus 2004).

Virheluokka	Kunnossapitotaso							
	1AA	1A	1	2	3	4	5	6
C	3	3	4	5	6	8	9	10
D	5	5	6	7	8	10	13	15
★	8	8	9	11	12	15	19	21

Esimerkiksi korkeuspoikkeama kunnossapitotasolla 1A saa olla virheluokassa C ainoastaan 3 mm. Tämä tarkoittaa maksimissaan 3 millimetrin poikkeamaa keskimääräisestä kiskon korkeustasosta 5 metrin matkalla. Kiskoon tehty epäjatkuvuuskohta ei siis saa juurikaan poiketa kiskon keskimääräisestä korkeustasosta. Myös raiteen kallistuksen ja kierouden raja-arvot rajoittavat raiteeseen tehtävän epäjatkuvuuskohdan geometriaa.

Kiskoon loveamalla tehdyn epäjatkuvuuskohdan sijaan on myös tarkasteltu kohoa-
maa kiskoissa (Salmenperä & Nurmikolu 2012). Tällöin kiskoista ei tarvitse poistaa ma-
teriaalia, vaan kiskon päälle voitaisiin asentaa eräänlainen kiskopomppu. Erilaiset kis-
kopomppun muodon hahmotelmat näkyvät kuvassa 3.14.



Kuva 3.14. Erilaisia kiskopomppun muotoja (Salmenperä & Nurmikolu 2012).

Vaihtoehto (a) kuvaa jo aiemmin kokeiltua lovea kiskossa. Koska kiskoja ei haluta vaurioittaa, lovea vastaava vaikutus saataisiin lisäämällä kiskon päälle kohoama (b). Yli-ajavat pyörät pyöristäisivät kohoaman reunoja, jolloin päädyttäisiin malliin (c). Toisaalta suurempi pyöriin kohdistuva iskuvoima saataisiin sijoittamalla kaksi pomppua peräkkäin (d), jolloin kulmamuuutos ja siten myös iskuvoima kasvaisi.

3.6.2 Muut menetelmät

Kiskon aaltokorrugaatio on kiskossa tietyllä aallonpituudella toistuva muotovirhe. Korrugaatio synnyttää värähtelyjä, joiden taajuus on korrugaation aallonpituuden ja junan nopeuden funktio. Mikäli muotovirheen aiheuttaman herätteen taajuus vastaa telirakenteen ominaistajuutta, telirakenteen ominaisvärähtely voimistuu ja syntynyt resonanssi saattaa irrottaa junasta lunta ja jäätä.

Radan täristys voisi irrottaa junasta lunta ja jäätä siten, että kiskoihin ei tarvitsisi tehdä rakenteellisia muutoksia. Kiskoja voitaisiin täristää sähkömotorisella täristemellä esimerkiksi ennen huoltohalliin ajamista, jolloin lumen sulatus ennen huoltoa helpottuisi. (Salmenperä & Nurmikolu 2012.)

4 JUNAKALUSTON VÄRÄHTELY JA HERÄTTEET

Koneiden ja rakenteiden värähtely on yleensä haitallista, ja värähtelyn hallitsemiseksi on tärkeää selvittää rakenteen ominaistaajuuudet ja niitä vastaavat värähtelymuodot. Junakaluston värähtely voi aiheuttaa vaurioita sekä junakalustolle että kiskolle. Lisäksi vaihteiden epäjatkuvuuskohtien aiheuttama värähtely voi irrottaa junan alustasta lunta, joka voi pudota vaihteen kielen ja tukikiskon väliin estäen vaihteen liikkeen. Toisaalta junakaluston värähtelyä voidaan myös hyödyntää, sillä oikealla kohdalla aiheutettu värähtely voi irrottaa lunta sopivasti esimerkiksi ennen vaunun huoltoa. Värähtelyanalyysin avulla saadaan selville junakalustossa tapahtuvien värähtelyiden suuruus ja värähtelytaajuus, ja niiden avulla voidaan tehdä arvioita värähtelyn haitallisuudesta.

Värähtelyksi kutsutaan kappaleen jaksollisesti toistuvaa liikettä. Liike toistuu värähtelyssä tietyn määräjän välein joko täysin tai melkein samanlaisena. Värähtelyt jaetaan kahteen ryhmään: ominaisvärähtelyihin ja pakkovärähtelyihin. Tämän lisäksi värähtelyt voidaan jakaa vaimenemattomiin ja vaimeneviin. Värähtely voi olla täysin vaimenemattomaa vain teoriassa, jolloin systeemillä ei ole ulkoista eikä sisäistä kitkaa. Käytännössä todellisen systeemin värähtelyt ovat kuitenkin aina vaimenevia, sillä systeemi ei ole koskaan täysin kitkaton. Kun systeemiin ei vaikuta lainkaan ulkoisia herätevoimia, värähtelyn amplitudi pienenee lopulta vaimennuksen seurauksena nolaksi. (Salmi & Virtanen 2006.)

4.1 Värähtelyn teoriaa

Ominaisvärähtely kuvaa mekaanisen systeemin liikettä silloin, kun se liikkuu ilman ulkoisten voimien vaikutusta. Ominaisvärähtely alkaa, kun systeemi poikkeutetaan stabiilista tasapainoasemastaan. Tämän jälkeen systeemin palautusvoimat yrittävät palauttaa systeemin takaisin tasapainoasemaan, jolloin syntyy jaksoittain toistuva tasapainoaseman suhteen edestakainen liike. Jokainen ominaisvärähtely tapahtuu sille ominaisella taajuudella, jota kutsutaan ominaistaajuudeksi. Ominaisvärähtelymuodot ja -taajuudet riippuvat systeemin jäykkyys- ja hitausominaisuuksista. (Salmi & Virtanen 2006.)

Pakkovärähtely kuvaa mekaanisen systeemin liikettä silloin, kun siihen vaikuttavat palautusvoimien lisäksi ulkoiset voimat. Nämä ulkoiset voimat pakottavat systeemin värähtelemään, jolloin syntyvää liikettä kutsutaan pakkovärähtelyksi. Systeemiin vaikuttavaa pakkovoimaa kutsutaan myös systeemin herätteeksi. (Salmi & Virtanen 2006.)

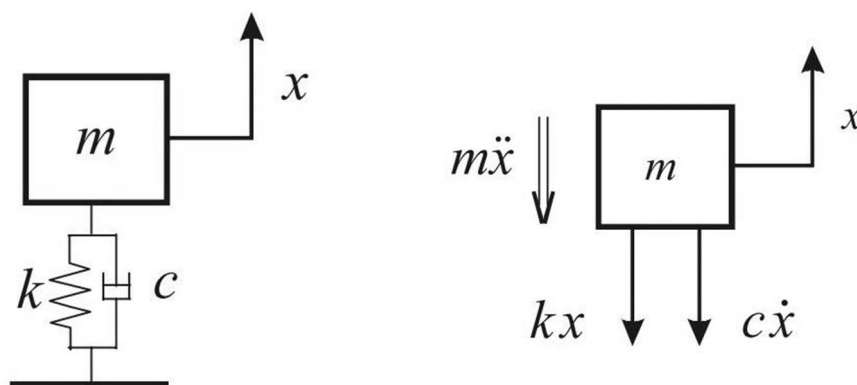
Todellista värähtelevää systeemiä kuvataan yleensä yksinkertaistetulla matemaattisella mallilla. Mallin tarkoituksena on esittää kaikki todellisen systeemin osat, jotka

vaikuttavat oleellisesti systeemin värähtelykäyttäytymiseen. Matemaattinen malli koostuu massoista, jousista ja vaimentimista, joiden arvot vastaavat mahdollisimman tarkasti todellista systeemiä. Matemaattiset mallit rakennetaan usein pistemäisistä massoista ja hitausmomenteista sekä näitä yhdistävistä jousista ja vaimentimista. Tällaista mallia kutsutaan diskreetiksi malliksi. Diskreetti malli kuvaa systeemin massa-, jäykkyys- ja vaimennusominaisuuksia keskitettyinä erillisille osille. Jatkuvassa mallissa sen sijaan ominaisuudet ovat jakaantuneet jatkuvasti osan koko alueelle. (Lähtenmäki 2007.)

Mallissa systeemille määrätään myös sen vapausasteiden eli liikesuuntien lukumäärä. Todellisuudessa rakenteella on ääretön määrä vapausasteita, mutta laskentamallissa vapausasteiden määrä on rajattu. Vapausasteiden määrää lisäämällä mallista saa tarkemman, mutta samalla laskenta muuttuu vaativammaksi.

4.1.1 Liikkeyhtälöt

Systeemin värähtelyliikettä voidaan kuvata liikkeyhtälöillä, joissa on mukana systeemin massa-, jäykkyys- ja vaimennusarvot. Lisäksi liikkeyhtälöiden muodostamiseksi tarvitaan tietoa systeemiin vaikuttavista voimista. Liikkeyhtälöistä saadaan ratkaistua systeemin värähtelykäyttäytyminen. Yksinkertaisimmillaan värähtelevää systeemiä voidaan kuvata yhden vapausasteen diskreetillä mallilla (kuva 4.1). Yhden vapausasteen mallissa systeemin paikka voidaan ilmaista yhden koordinaatin x avulla.



Kuva 4.1. Yhden vapausasteen värähtelymalli ja vapaakappalekuva.

Vapaakappalekuvan perusteella mallille voidaan muodostaa liikkeyhtälö (Thomson 1989):

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (4.1)$$

missä

m on massa

k on jousivakio

c on vaimennuskerroin

x on siirtymä

Tällaisen yhden vapausasteen vaimentamattoman systeemin ominaistajuuus on

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.2)$$

Kuvan 4.1 mukaisen yhden vapausasteen vaimennetun systeemin ominaistajuuus on

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{1 - \xi^2} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.3)$$

Kaavassa 4.3 suhteellinen vaimennuskerroin ξ saadaan kaavalla 4.4:

$$\xi = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (4.4)$$

Systeemin yleinen n-vapausasteinen liikeyhtälö voidaan muodostaa kaavan 4.5 mukaan

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (4.5)$$

missä

- $[M]$ on systeemin massamatriisi ($n \times n$)
- $[C]$ on systeemin vaimennusmatriisi ($n \times n$)
- $[K]$ on systeemin jäykkyyismatriisi ($n \times n$)
- $\{F\}$ on systeemin voimavektori ($n \times 1$)
- $\{x\}$ on systeemin asemavektori ($n \times 1$)

Kun kyseessä on ominaisvärähtely, systeemiin ei vaikuta ulkoisia voimia. Tällöin liikeyhtälö saa muodon (4.6):

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{0\} \quad (4.6)$$

Liiekyhtälöryhmässä on systeemin vapausasteiden mukainen määrä liiekyhtälöitä. Jatkuualla mallilla kuvatu systeemin dynaamista liikettä kuvaavat liiekyhtälöt ovat osittaisdifferentiaaliyhtälöitä, joiden ratkaiseminen analyttisesti on usein hyvin haastavaa. Ainoastaan yksinkertaisimmissa tapauksissa systeemin analyttinen ratkaisu onnistuu melko helposti. Jos systeemiä kuvataan diskreetillä mallilla, liiekyhtälöt ovat tavallisia differentiaaliyhtälöitä, joiden ratkaisu onnistuu helpommin. (Lähtenmäki 2007.)

Myös systeemin vapausasteiden lukumäärä vaikuttaa oleellisesti laskennan vaativuuteen. Systeemin värähtelyanalyysin laatimisessa onkin otettava huomioon, mikä on paras suhde systeemin tarkkuuden ja analyysin vaatiman ajankäytön suhteen.

4.1.2 Ominaistaajuudet ja -muodot

Vaimentamattoman n-vapausasteisen systeemin ominaistaajuudet saadaan laskettua systeemin massa- ja jäykkyyssmatriisien avulla ominaisarvotehtävänä kaavan 4.7 mukaisesti:

$$\det([K] - \lambda_n[M]) = 0 \quad (4.7)$$

Tässä ominaisarvon λ_n , ominaiskulmataajuuden ω_n ja ominaistaajuuden f_n yhteys on:

$$\lambda_n = \omega_n^2 = (2\pi f_n)^2 \quad (4.8)$$

Ominaisarvotehtävästä ratkaisuna saadaan rakenteen ominaisarvot λ_n ja samalla siis ominaistaajuudet f_n . Ominaismuodot ϕ_n saadaan laskettua vastaavasti eri ominaistaajuuksille vektorimuotoisina:

$$(K - \lambda_n M)\phi_n = 0 \quad (4.9)$$

Ominaisvektori $\{\phi\}$ kuvaa rakenteen ominaismuotoa eli sitä värähtelymuotoa, jolla rakenne vastaavalla ominaistaajuudella värähtelee. Ominaismuodoilla ei ole absoluuttista suuruutta, vaan ominaisvektorit kuvaavat vain liikkeen suhteellista suuruutta toisiin vapausasteisiin nähden.

Vaimennetun n-vapausasteisen systeemin ominaismuotojen laskeminen on huomattavasti vaikeampaa. Diskreetin mallin liikeyhtälö on toisen asteen differentiaaliyhtälö, joka tulee muokata ensimmäisen asteen differentiaaliyhtälöksi. Vaimennetun systeemin liikeyhtälö voidaan muokata esimerkiksi seuraavanlaiseen muotoon (Tongue 1996):

$$[B]\dot{Y} - [A]Y = \{0\} \quad (4.10)$$

Liikeyhtälössä

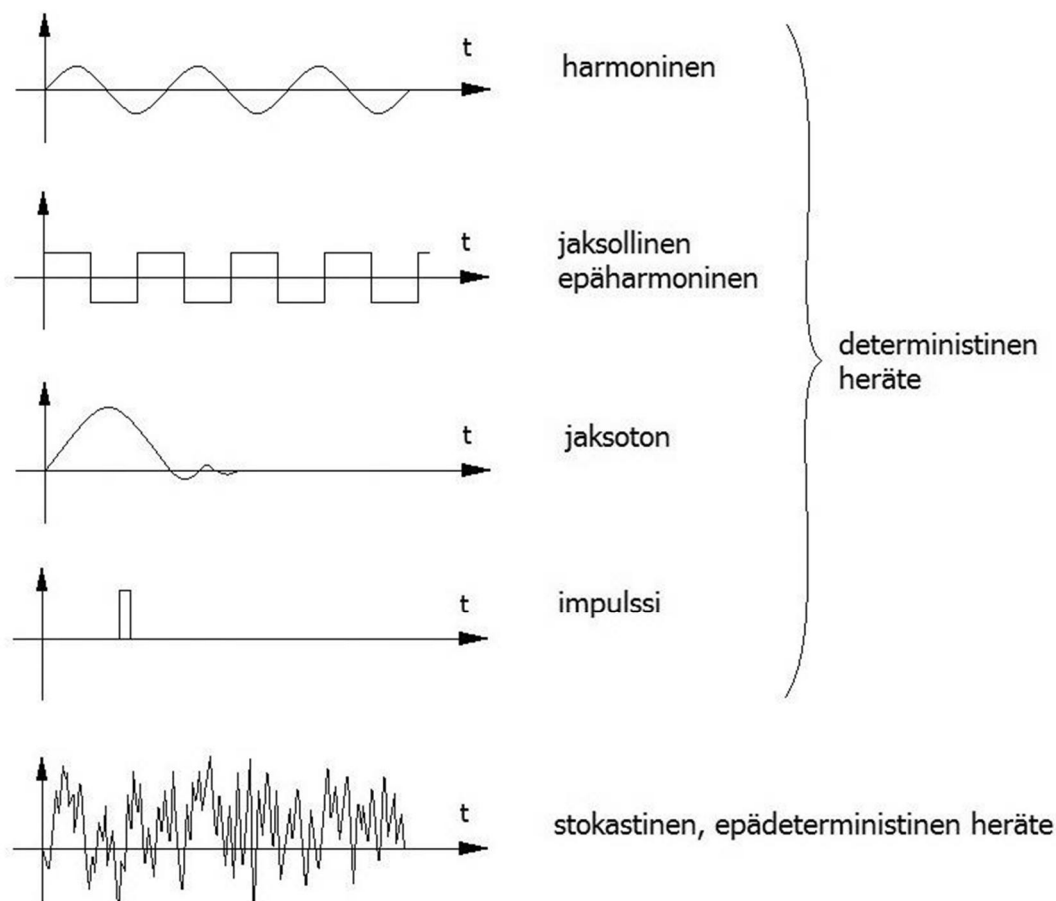
$$[B] = \begin{bmatrix} -[K] & [0] \\ [0] & [M] \end{bmatrix} \quad [A] = \begin{bmatrix} [0] & -[K] \\ -[K] & -[C] \end{bmatrix} \quad Y^T = \{x_1 \dots x_n \dot{x}_1 \dots \dot{x}_n\}$$

Kun liikeyhtälö on muokattu ensimmäisen asteen differentiaaliyhtälöksi, siitä saadaan laskettua valmisohjelmalla systeemin ominaismuodot ja -taajuudet.

4.1.3 Herätteet

Värähtelyanalyysissä vaikuttavat ulkoiset kuormitukset eli herätteet voidaan luokitella deterministisiin ja epädeterministisiin herätteisiin. Deterministinen heräte noudattaa joltain tiettyä funktiota, joka voidaan määrittää jokaisena ajanhetkenä. Esimerkiksi harmoninen sinimuotoinen heräte on deterministinen. Epädeterministinen eli satunnaisheräte on epäsäännöllinen eikä sitä voida kuvata minkään funktion avulla. Satunnaisherätteen aiheuttamaa värähtelyä kutsutaan stokastiseksi värähtelyksi. (Salmi & Virtanen 2006.)

Kuvassa 4.2 on esitetty erilaisia herätefunktioita. Herätefunktiot on jaoteltu deterministisiin ja epädeterministisiin herätteisiin. Kaksi ylintä herätettä ovat lisäksi jaksollisia. Kun heräte vaikuttaa vain lyhyen aikaa, sitä kutsutaan transienttikuormitukseksi. Transienttikuormitus saavuttaa nopeasti maksimiarvonsa ja aiheuttaa systeemiin lyhytaikaisen liiketilan. Esimerkiksi kuvan 4.2 impulssiheräte kuvaa jaksotonta transienttikuormitusta.



Kuva 4.2. Erilaisia herätefunktioita.

Matemaattisessa mallissa herätteen tulee olla tarkkaan määritetty, ja heräte ilmoitetaan aina funktion tai funktioiden summan avulla. Tässä onkin rajoitettu tarkastelemaan matemaattiseen malliin soveltuvia deterministisiä herätteitä ja erityisesti jaksollisia herätteitä. Jaksollinen heräte voidaan aina esittää Fourier-sarjana, jolloin sarjan jokaista termiä voidaan käsitellä harmonisena. Fourierin sarjakehitelmä voidaan laskea kaavan 4.11 avulla (Rao 1995):

$$F(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (4.11)$$

Kaavassa 4.11 vakio a_0 on tarkasteltavan funktion keskiarvo ja vakiot a_n ja b_n ovat kertalukua n olevan harmonisen komponentin amplitudit:

$$a_0 = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} F(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} F(t) \cos n\omega t dt$$

$$b_n = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} F(t) \sin n\omega t dt$$

missä

ω on herätteen alin ominaiskulmataajuus

τ on herätteen jaksonaika

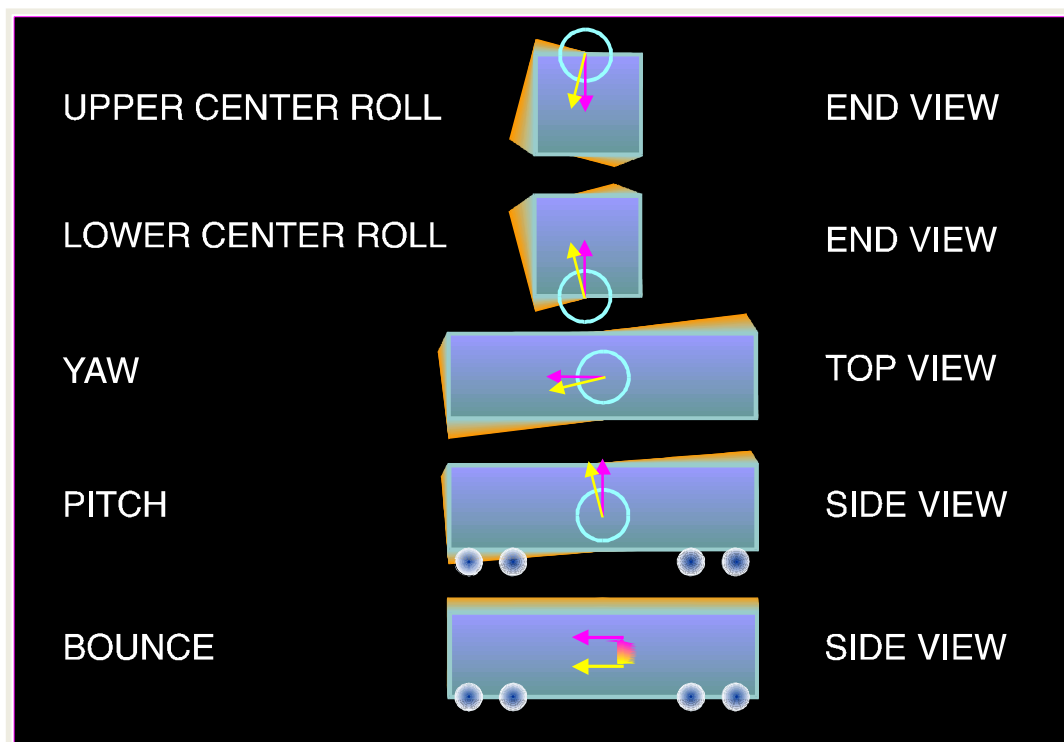
Kun jaksollinen heräte esitetään Fourier-sarjana, yhden vapausasteen liikeyhtälö saa muodon:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (4.12)$$

Fourier-sarjan avulla jaksollinen kuormitus voidaan esittää harmonisten herätteiden summana, mikä auttaa herätteen aiheuttaman vasteen selvittämisessä. Vasteella tarkoitetaan systeemin siirtymä-, nopeus- ja kiihtyvyytsvektoreita, joiden arvot ovat ajasta riippuvia. Usean vapausasteen vaimennetuissa systeemeissä vasteen selvittäminen laskennallisesti on kuitenkin hankalaa tai jopa mahdotonta ilman laskentaohjelmien apua.

4.2 Junakaluston värähtelykäyttäytyminen

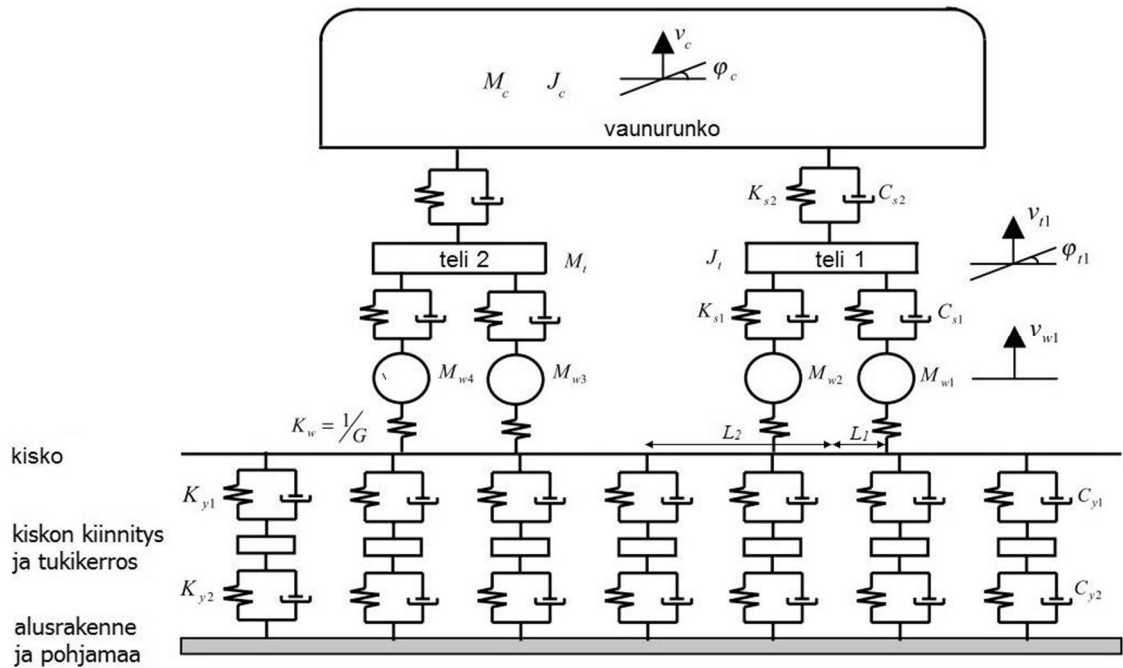
Kokonaisen nivelöidyn junakaluston värähtelykäyttäytyminen on hyvin monimutkainen ilmiö, joten tässä yhteydessä on keskitytty vain yksittäisen vaunun värähtelymalliin. Kuvassa 4.3 on esitetty yksittäisen vaunurungon perusvärähtelymuodot ja niiden nimitykset. Värähtelymuodot ovat jäykän kappaleen ominaismuotoja kaksiakseliselle tai kaksiteliselle vaunulle. Vaunun jousituksella on merkittävä vaikutus vaunurungon värähtelymuotoihin.



Kuva 4.3. Vaunurungon ominaisvärähtelymuodot (Transportation Technology Center Inc. 2010). Englanninkieliset värähtelymuotojen nimitykset ovat vakiintuneet käyttöön Suomessa.

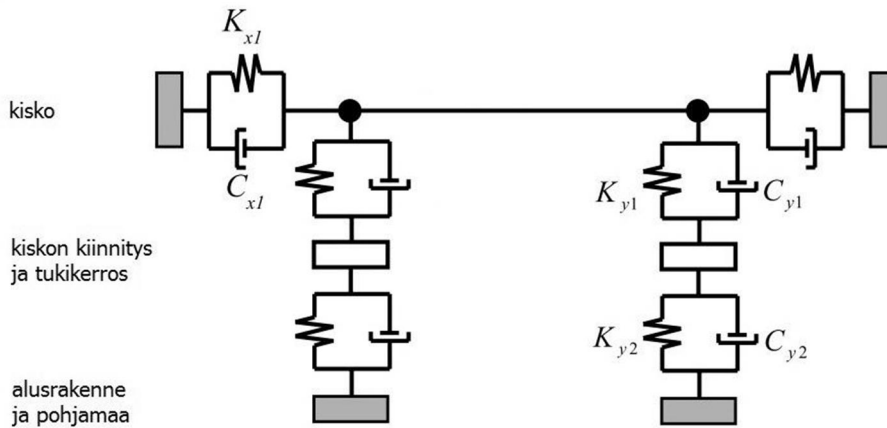
Kuvassa 4.3 ylimpinä näkyvät vaunun roll-värähtelymuodot, joissa värähtely tapahtuu edestakaisena kiertymisliikkeenä vaunun pitkittäissuuntaisen akselin ympäri. Värähtelyihin vaikuttavat vaunun massa, hitausmomentti pituusakselin suhteen, vaunun painopisteen pystysuuntainen sijainti, jousituksen vaaka- ja pystysuuntainen jäykkyys ja vaimennus sekä pystysuuntaisten jousien sivuttaissuuntainen etäisyys. Yaw-värähtelymuodossa vaunu värähtelee kuvan 4.3 mukaan pystyakselin ympäri tapahtuvalla edestakaisella värähtelyliikkeellä. Värähtelyyn vaikuttavat tällöin vaunun massa, vaunun hitausmomentti pystyakselin suhteen, jousituksen vaakasuuntainen jäykkyys ja vaimennus sekä telien keskinäinen etäisyys. Lisäksi värähtelyyn vaikuttavat telien ja vaunurungon välinen kiertojäykkyys, vaimennus ja kitka. Kuvan 4.3 toiseksi alimmaisessa kohdassa vaunu värähtelee pitch-muodossa kiertymällä vaaka-akselin ympäri. Värähtelyyn vaikuttavat vaunun massa, hitausmomentti vaaka-akselin suhteen, pystysuuntaisen jousituksen jäykkyys ja vaimennus sekä telien keskinäinen etäisyys. Alimpana kuvassa 4.3 on esitetty bounce-muoto, jossa vaunu värähtelee pystyakselin suuntaisesti. Tähän värähtelymuotoon vaikuttavat pääasiassa vaunun massa, jousituksen pystysuuntainen jäykkyys sekä vaimennus. (Hakulinen et al. 2012.)

Junakaluston värähtelymallissa huomioidaan pyöräkerran ja telin sekä telin ja vaunurungon väliset jousitukset ja vaimennukset. Värähtelymallin vapausasteet voidaan valita eri tavoin. Kuvassa 4.4 on esitetty yksi esimerkki junakaluston värähtelymallista. Esimerkin värähtelymallissa vapausasteiksi on valittu vaunun, pyöräkertojen ja telien pystysuuntaiset siirtymät v sekä vaunun ja telien kulmamuuтокset φ .



Kuva 4.4. Junan värähtelymalli (muokattuna lähteestä Lei & Noda 2002).

Kuvan 4.4 värähtelymallissa on mukana myös kiskon, tukikerroksen ja alusrakenteen osuus, joiden jäykkyys- ja vaimennusominaisuudet kytkeytyvät vaunurungon liikkeisiin raiteen ja pyörän välisten kosketusvoimien kautta. Kiskoja käsitellään mallissa palkkeina. Radan osuus värähtelymallista käy tarkemmin ilmi kuvasta 4.5. (Lei & Noda 2002.)



Kuva 4.5. Ratarakenteen värähtelymalli (muokattuna lähteestä Lei & Noda 2002).

Kuvissa 4.4 ja 4.5:

- K_{x1} , K_{y1} on kiskon kiinnityksen ja tukikerroksen yhdistetty jäykkyys x- ja y-suunnissa
- C_{x1} , C_{y1} on kiskon kiinnityksen ja tukikerroksen yhdistetty vaimennus x- ja y-suunnissa
- K_{y2} , C_{y2} on radan alusrakenteen ja pohjamaan jäykkyys ja vaimennus
- K_{s1} , C_{s1} on pyörän ja telin välinen jäykkyys ja vaimennus
- K_{s2} , C_{s2} on telin ja vaunurungon välinen jäykkyys ja vaimennus

v_c, φ_c on vaunurungon pystysuuntainen siirtymä ja kallistuskulma

v_{ti}, φ_{ti} on i:nneen telin pystysuuntainen siirtymä ja kallistuskulma

M_{wi} on i:nneen pyörän massa

M_c, J_c on vaunurungon massa ja hitausmomentti

M_t, J_t on telin massa ja hitausmomentti

$2L_1$ on telin pyöräkertojen välinen etäisyys

$2L_2$ on telikeskiöväli

Mallin ylemmän osan eli vaunurungon, telien ja pyörien liikeyhtälöä voidaan tässäkin tapauksessa kuvata yleisellä liikeyhtälön kaavalla 4.13:

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{x}}\} + [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{x}}\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{x}\} = \{\mathbf{F}(\mathbf{t})\} \quad (4.13)$$

Siirtymävektori on tällöin kymmenen vapausasteen mallille kaavan 4.14 mukainen

$$\{\mathbf{x}\} = \{v_c \ \varphi_c \ v_{t1} \ \varphi_{t1} \ v_{t2} \ \varphi_{t2} \ v_{w1} \ v_{w2} \ v_{w3} \ v_{w4}\}^T \quad (4.14)$$

Tässä tapauksessa massa-, jäykkyys- ja vaimennusmatriisit ovat (Lei & Noda 2002):

$$[\mathbf{M}] = \text{diag}\{M_c \ J_c \ M_t \ J_t \ M_t \ J_t \ M_{w1} \ M_{w2} \ M_{w3} \ M_{w4}\} \quad (4.15)$$

$$[\mathbf{K}] = \begin{bmatrix} 2K_{s2} & 0 & -K_{s2} & 0 & -K_{s2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 2L_2^2 K_{s2} & -L_2 K_{s2} & 0 & L_2 K_{s2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 2K_{s1} + K_{s2} & 0 & 0 & 0 & -K_{s1} & -K_{s1} & 0 & 0 \\ & & & 2L_1^2 K_{s1} & 0 & 0 & -K_{s1} L_1 & -K_{s1} L_1 & 0 & 0 \\ & & & & 2K_{s1} + K_{s2} & 0 & 0 & 0 & -K_{s1} & -K_{s1} \\ & & & & & 2L_1^2 K_{s1} & 0 & 0 & -K_{s1} L_1 & K_{s1} L_1 \\ & & \text{symm.} & & & & K_{s1} & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & K_{s1} & 0 & 0 \\ & & & & & & & & K_{s1} & 0 \\ & & & & & & & & & K_{s1} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

$$[\mathbf{C}] = \begin{bmatrix} 2C_{s2} & 0 & -C_{s2} & 0 & -C_{s2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 2L_2^2 C_{s2} & -L_2 C_{s2} & 0 & L_2 C_{s2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 2C_{s1} + C_{s2} & 0 & 0 & 0 & -C_{s1} & -C_{s1} & 0 & 0 \\ & & & 2L_1^2 C_{s1} & 0 & 0 & -C_{s1} L_1 & -C_{s1} L_1 & 0 & 0 \\ & & & & 2C_{s1} + C_{s2} & 0 & 0 & 0 & -C_{s1} & -C_{s1} \\ & & & & & 2L_1^2 C_{s1} & 0 & 0 & -C_{s1} L_1 & C_{s1} L_1 \\ & & \text{symm.} & & & & C_{s1} & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & C_{s1} & 0 & 0 \\ & & & & & & & & C_{s1} & 0 \\ & & & & & & & & & C_{s1} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Matriiseihin sijoitetaan vaunurungon, pyörien ja telien massa-, jäykkyys- ja vaimennusominaisuudet. Arvot vaihtelevat käytetyn kaluston mukaisesti, ja esimerkiksi matkustaja- ja tavaravaunun ominaisuudet eroavat yleensä selvästi toisistaan.

4.2.1 Matkustajavaunu

Seuraavaksi tarkastellaan esimerkkien avulla matkustaja- ja tavaravaunujen massa-, jäykkyys- ja vaimennusominaisuuksia. Esimerkkeinä käytettyjä vaunutyyppejä on tarkasteltu TTY:n ratarakennetutkimuksissa jo aiemmin Hakulinen et al. (2012) toimesta. Matkustajavaunun esimerkkinä on käytetty Ex-vaunua eli yksikerroksista IC-vaunua. Vaunun tietoja on kerätty taulukkoon 4.1. Taulukossa ensiöjousituksella tarkoitetaan pyöräkerran ja telin välistä jousitusta ja toisiojousituksella telin ja vaunurungon välistä jousitusta.

Taulukko 4.1. Ex-vaunun ominaisuuksia (Hakulinen et al. 2012).

Vaunun massa	46000 kg
Telin massa	6380 kg
Pyöräkerran massa	1250 kg + laakeripesä 2×49 kg
Jarrulevyjen massa	500 kg
Jousittamaton kokonaismassa	1900 kg pyöräkertaa kohti
Ensiöjousituksen jousivakio	919 N/mm (pyörää kohti)
Ensiöjousituksen vaimennus (oletettu lineaariseksi)	1000N / 0,2m/s
Toisiojousituksen jousivakio	206,6 N/mm (sisä) 250 N/mm (ulko)
Toisiojousituksen vaimennus	2500N / 0,2m/s (pystysuora) 6000N / 0,3m/s (vaakasuora)
Pyörän halkaisija	uutena 920 mm, kuluneena 840 mm
Telikeskiöväli	19 m
Telin pyöräkertojen välinen etäisyys	2,56 m

Ex-vaunun värähtelymalli vastaa kuvan 4.4 värähtelymallia, jossa vaunurungon ja telien sekä telien ja pyöräkertojen välillä on jousitus.

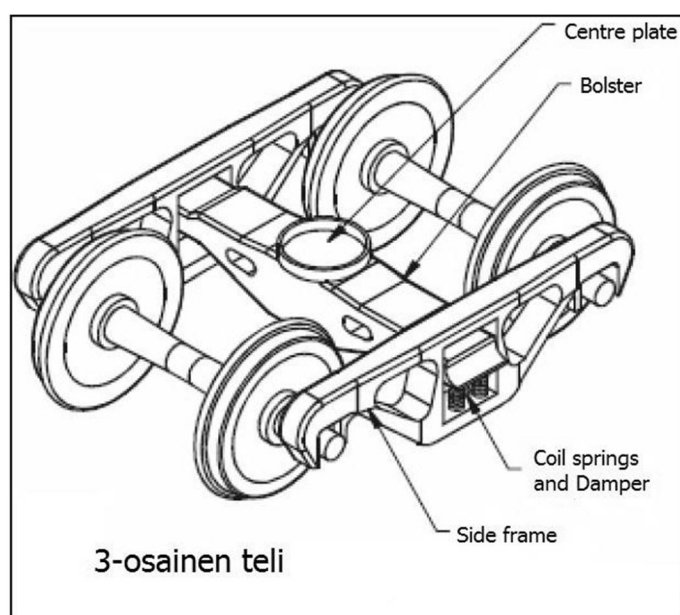
4.2.2 Tavaravaunu

Tavaravaunun esimerkkinä on käytetty idän liikenteen Vok-vaunua, joka on korkealaitainen avovaunu. Vaunun tiedot on kerätty taulukkoon 4.2.

Taulukko 4.2. *Vok-tavaravaunun ominaisuuksia (Hakulinen et al. 2012).*

Vaunun massa	tyhjänä 22000kg, lastattuna 88000kg
Telin massa	4680 kg
Telin sivupalkin massa	500 kg
Telin keskiöpalkin massa	3680 kg
Pyöräkerran massa	1230 kg laakeripesineen
Jousittamaton kokonaismassa	1650 kg
Kokonaisjäykkyys (yhdele puolelle)	3,85 MN/m
Kokonaisvaimennus, kiilaelementti	kiilan kulma 45°, kitkakerroin 0,4
Pyörän halkaisija	957 mm
Telikeskiöväli	8,65 m
Telin pyöräkertojen välinen etäisyys	1,8 m

Vok-vaunussa on kolmiosisaiset telit, joten sen värähtelymalli poikkeaa kuvassa 4.4 esitetyistä värähtelymallista. Kolmiosisaisessa telissä käytetään yleensä vain toisiojousitusta, joka tarkoittaa telin keskiö- ja sivupalkin (*bolster*, *sideframe*) välillä vaikuttavaa telin sisäistä jousitusta (kuva 4.6).

**Kuva 4.6.** *3-osaisen telin rakenne (Guidelines to best practices... 2001).*

Kolmiosaisen telin sivupalkit on kiinnitetty yleensä jousittamattomasti akseleihin. Tämä aiheuttaa teliin suuremman jousittamattoman massan. Vaimennuksessa käytetään kiila-elementtejä, jolloin telin vaimennusominaisuudet muuttuvat kitkan ansiosta kuormituksen mukaan.

4.2.3 Ominaismuotojen laskeminen

Luvussa 4 esitettiin aiemmin junakaluston vaimennettu värähtelymalli ja kyseiseen malliin liittyvät massa-, jäykkyys- ja vaimennusmatriisit. Matriisien muodostamista varten tarvitaan tietoa junakaluston massoista, jousituksista, vaimennuksista ja perusgeometriasta, eli telikeskiövälistä ja telin pyöräkertojen välisestä etäisyydestä. Nämä tiedot on esitetty sekä matkustaja- että tavaravaunun taulukoissa 4.1 ja 4.2. Lisäksi aiemmin käytiin läpi vaimennetun systeemin ensimmäisen asteen differentiaaliyhtälöksi muokattu liikeyhtälö:

$$[B]\dot{Y} - [A]Y = \{0\} \quad (4.18)$$

Liikeyhtälössä

$$[B] = \begin{bmatrix} -[K] & [0] \\ [0] & [M] \end{bmatrix} \quad [A] = \begin{bmatrix} [0] & -[K] \\ -[K] & -[C] \end{bmatrix} \quad Y^T = \{x_1 \dots x_{10} \dot{x}_1 \dots \dot{x}_{10}\}$$

Koska kuvassa 4.4 esitetyssä värähtelymallissa on kymmenen vapausastetta, ovat kaikki värähtelymalliin liittyvät matriisit 10×10 -matriiseja. Jos kyseisen värähtelymallin ominaismuodot halutaan ratkaista liikeyhtälön 4.18 avulla, muodostuu liikeyhtälössä mukana olevista matriiseista $[B]$ ja $[A]$ jo 20×20 -matriiseja. Matriisien koon vuoksi ominaisarvot ja -vektorit saadaan helpoiten laskettua käyttämällä jonkin matematiikkaohjelman ominaisarvoratkaisijaa. Vaimennuksen vuoksi voidaan lisäksi olettaa, että ominaisvektoreista tulee kompleksisia.

Matkustajavaunun esimerkkinä käytetty Ex-vaunu vastaa rakenteeltaan kuvassa 4.4 esitettyä värähtelymallia. Kun taulukon 4.1 matkustajavaunun arvot sijoitetaan massa-, jäykkyys- ja vaimennusmatriiseihin 4.15–4.17 ja tämän jälkeen muodostetaan liikeyhtälössä 4.18 tarvittavat matriisit $[A]$ ja $[B]$, saadaan selville matkustajavaunun ominaisvärähtelymuodot. Ominaisvärähtelymuodot on laskettu Matlabin ominaisarvoratkaisijalla.

Koska ominaisarvoratkaisijaan sijoitetut matriisit ovat 20×20 -matriiseja, saadaan ratkaisijasta ulos ominaisvektoreista koostuva 20×20 -matriisi sekä ominaisarvot kertova 20×20 -matriisi. Alkuperäisen liikeyhtälön vapausasteita vastaavat ominaisarvot ja -vektorit saadaan ottamalla näistä matriiseista ensimmäinen 10×10 -lohkomatriisi, joka koostuu alkuperäisen matriisin kymmenestä ensimmäisestä rivistä ja sarakkeesta. Nämä ositetut matriisit kuvaavat värähtelymallin kymmenen siirtymävapausasteen ominaisvärähtelymuotoja ja -taajuuksia.

Laskussa saadut ominaisvektorit sisältävät kompleksilukuja, joten ne kannattaa muuttaa reaalisiksi. Ominaismuodoilla ei ole absoluuttista suuruutta, ja ominaisvektorin alkio kuvaa vain yhden vapausasteen suhteellista liikettä suhteessa muihin vapausasteisiin. Tämän vuoksi ominaisvektori voidaan kertoa millä tahansa luvulla. Kun ominais-

vektori kerrotaan luvulla $e^{-i\phi}$, missä ϕ on vektorin vaihekulma reaaliakselin suhteen, saadaan vektori muutettua reaaliseksi.

Myös ominaisarvot ovat kompleksilukuja. Ne ominaisarvot, jotka ovat toistensa liittolukuja, voidaan yhdistää. Näin saadaan sini- ja kosinimuotoiset ratkaisut. (Tongue 1996.) Ominaisaajuudet saadaan laskettua ominaisarvoista kaavasta 4.8 johdetun kaavan 4.19 avulla.

$$f_n = \frac{\sqrt{\lambda_n}}{2\pi} = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad (4.19)$$

Ominaisarvot ja ominaisaajuudet on lueteltu taulukossa 4.3. Matlab antaa ominaisarvot kompleksitasossa muodossa $\lambda = u+iv$, sillä se olettaa differentiaaliyhtälön ratkaisujen olevan muotoa $x = Xe^{\lambda t}$. Kaikkien ominaisarvojen reaaliosa on negatiivinen, mikä tarkoittaa liikkeen vaimenevan ajan myötä. Ominaisaajuudet lasketaan ominaisarvojen imaginaariosista, jotka kuvaavat kappaleen sinimuotoista värähtelyä $\sin(\omega t)$.

Taulukko 4.3. Värähtelymallista lasketut ominaisarvot ja -taajuudet.

i	i:s ominaisarvo λ	i:s ominaisaajuus f (1/s)
1	-0,0344	0,02952
2 ja 3	-0,8713±7,9871i	1,27117
4 ja 5	-14,1329±29,4634i	4,68925
6 ja 7	-5,0085±39,4108i	6,27242
8 ja 9	-4,7252±40,0121i	6,36811

Seuraavassa on esitetty ominaisaajuuksia vastaavat ominaisvektorit (4.20–4.24). Ominaisvektorit on kerrottu siten, että suurimman alkion arvo on yksi.

$$\mathbf{u}_1 = \{0.3805 \ -0.0332 \ 0.0654 \ -0.0896 \ 0.6957 \ -0.2368 \ -0.0493 \ 0.1801 \ 0.3913 \ 1\}^T \quad (4.20)$$

$$\mathbf{u}_2 = \mathbf{u}_3 = \{1 \ 0 \ -0.00359 \ 0 \ -0.00359 \ 0 \ -0.0502 \ -0.0502 \ -0.0496 \ -0.0496\}^T \quad (4.21)$$

$$\mathbf{u}_4 = \mathbf{u}_5 = \{0.9798 \ 0.0018 \ 0.9943 \ 0.0036 \ 0.9653 \ 0.0039 \ 1 \ 0.9907 \ 0.9593 \ 0.9694\}^T \quad (4.22)$$

$$\mathbf{u}_6 = \mathbf{u}_7 = \{0.982 \ 0.0032 \ 0.9969 \ 0.0038 \ 0.9673 \ -0.0038 \ 1 \ 0.9905 \ 0.9642 \ 0.9736\}^T \quad (4.23)$$

$$\mathbf{u}_8 = \mathbf{u}_9 = \{0.4187 \ 0 \ 0.069 \ 0 \ 0.067 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0.9976 \ 0.9976\}^T \quad (4.24)$$

Ominaisvektoreista \mathbf{u}_2 ja \mathbf{u}_3 , \mathbf{u}_4 ja \mathbf{u}_5 , \mathbf{u}_6 ja \mathbf{u}_7 sekä \mathbf{u}_8 ja \mathbf{u}_9 ovat toistensa liittovektoreita. Niitä vastaavat ominaisarvot ovat siksi toistensa liittolukuja. Ominaisarvoista laskettujen ominaisaajuuksien arvoja ja dynamiikkaohjelmalla laskettuja ominaisaajuuksia on verrattu toisiinsa luvussa 6. Lisäksi ominaismuotoja voidaan verrata kuvassa 4.3 esitettyihin vaunurungon ominaisvärähtelymuotoihin. Esimerkiksi ominaisvektorit \mathbf{u}_2 ja \mathbf{u}_3

kuvaavat selvästi bounce-värähtelymuotoa, jossa vaunu värähtelee pystyakselin suunnassa. Tämän voi päätellä vaunun pystysuuntaista siirtymää kuvaavan ensimmäisen vapausasteen arvosta, joka on selvästi suurempi kuin muiden vapausasteiden arvot.

4.3 Kaluston ja radan välisen dynamiikan mallintaminen

Aiemmin käsiteltiin junakaluston värähtelykäyttäytymistä erillään radan värähtelystä. Radan värähtelykäyttäytyminen vaikuttaa kuitenkin pyörän ja kiskon kontaktivoimien kautta oleellisesti myös kaluston värähtelyihin. Raiteen epäjatkuvuuskohdat aiheuttavat iskuvoimia junakaluston pyöriin ja toimivat siten heräteinä junakaluston värähtelyssä.

4.3.1 Radan värähtelyominaisuudet

Kiskon ja kaluston värähtelymallissa rataa voidaan yksinkertaisimmillaan kuvata pelkästään pyörän ja radan välisen jäykkyyden avulla. Ratarakenne voidaan tällöin mallintaa kimmoisasti tuetuilla palkeilla. (Hakulinen et al. 2012.) Kuvan 4.5 ratarakenteen värähtelymalli on monimutkaisempi, sillä siinä on huomioitu erikseen kiskon kiinnityksen ja tukikerroksen jäykkyys- ja vaimennusominaisuudet pysty- ja sivuttaissuunnissa sekä radan alusrakenteen ja pohjamaan jäykkyys- ja vaimennusominaisuudet. Taulukossa 4.4 on listattu radan jäykkyys- ja vaimennusarvoja.

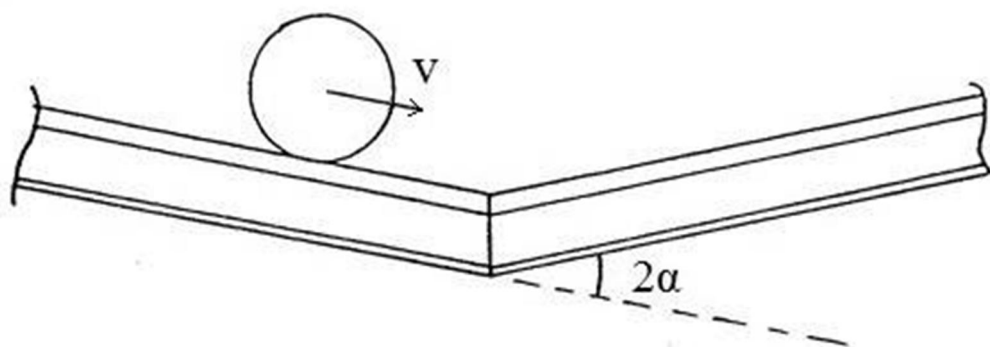
Taulukko 4.4. Radan jäykkyys- ja vaimennusarvoja. Hakulinen et al. (2012) ovat koonneet arvot eri lähteistä.

Kiskojen ja pölkkyjen välinen pystysuuntainen jäykkyys (Zw 900 NT... 1997)	95 MN/m
Kiskojen ja pölkkyjen välinen pystysuuntainen vaimennus (Li et al. 1999)	34 kN/(m/s)
Kiskojen ja pölkkyjen välinen sivuttaissuuntainen jäykkyys (Li et al. 1999)	70 MN/m
Kiskojen ja pölkkyjen välinen sivuttaissuuntainen vaimennus (Li et al. 1999)	34 kN/(m/s)
Yhden pölkyn ja ratapenkereen välinen kokonaisjäykkyys (Li et al. 1999; Kolisoja et al. 2000)	72 MN/m
Pölkkyjen ja maan välinen kokonaisvaimennus yhdelle pölkylle (Li et al. 1999)	50 kN/(m/s)

Ratarakenteen malli muodostetaan aina tarkasteltavan ongelman mukaan. Esimerkiksi raiteen epäjatkuvuuskohtien tarkastelussa junakaluston liike tapahtuu lähinnä pystysuunnassa, joten kiskon sivuttaissuuntaisilla ominaisuuksilla ei ole suurta merkitystä. Toisaalta vaihteet ja kiskojoitkokset, jotka sijaitsevat tiukassa kaarteessa, voivat aiheuttaa myös merkittäviä sivuttaissuuntaisia dynaamisia voimia junakalustoon (Schmid et al. 2010).

4.3.2 Iskuvoimat P_1 ja P_2

Epäjatkuvuuskohta raiteessa aiheuttaa junan pyöriin herätteen, jota voidaan kuvailla iskuvoimien P_1 ja P_2 avulla. P_1 -voima on staattisen pyörävoiman ja korkeataajuisen dynaamisen voiman yhdistelmä. Korkeataajuinen dynaaminen voima syntyy epäjatkuvuuskohdissa pyörän ja kiskon liikkeessä toisiaan kohti. P_2 -voima kuvaa staattisen pyörävoiman ja matalataajuisen dynaamisen voiman yhdistelmää. Matalataajuinen dynaaminen voima syntyy pyörän, kiskon ja ratapölkkyjen liikkeessä yhtenä kokonaisuutena alaspäin radan alusrakenteessa. Iskuvoimien suuruuden on kuvattu olevan suoraan verrannollinen junan nopeuteen ja kiskon kulmamuuтокseen epäjatkuvuuskohdassa (kuva 4.7). Esimerkiksi kiskojoitkosta voidaan kuvata kulmamuuтокsella $\alpha = 20$ mrad eli $\alpha = 1,15^\circ$ (Schmid et al. 2010). Voimiin vaikuttavat myös vaunun, pyöräkertojen ja radan ominaisuudet.

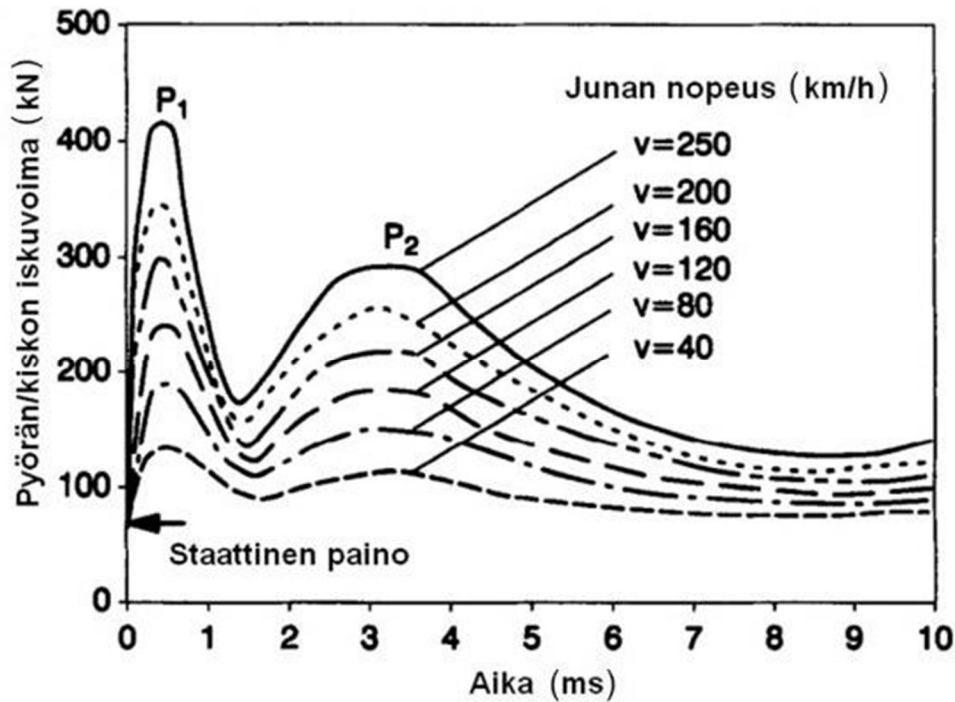


Kuva 4.7. Kiskon kulmamuuтокs epäjatkuvuuskohdassa (Salmenperä & Nurmikolu 2012).

Iskuvoimista P_1 on aina taajuudeltaan selvästi korkeampi kuin P_2 . Tyypilliset värähtelytaajuudet iskuvoimille ovat (Schmid et al. 2010):

- P_1 , taajuus yli 200 Hz
- P_2 , taajuus 30–100 Hz

Kuvassa 4.8 on esitetty kiskojoitkosten painumakohtien aiheuttamat iskuvoimat ajan suhteen junan eri nopeuksilla. Kuvasta erottaa selvästi, että iskuvoimista P_1 on suurempi ja lyhytkestoisempi kuin P_2 . Lisäksi P_1 -voima vaikuttaa ennen P_2 -voimaa.



Kuva 4.8. Kiskojaatkosten painumakohdista aiheutuvat P_1 - ja P_2 -voimat (Zhai & Cai 1997).

Kuvasta 4.8 käy ilmi, että iskuvoimien suuruus nousee merkittävästi junan nopeuden kasvaessa. Iskuvoiman ensimmäisen piikin aiheuttaa korkeataajuuksinen P_1 -voima, jota Schmid et al. (2010) kuvailevat kaavalla 4.25:

$$P_1 = \alpha V \sqrt{\frac{k_H m_e}{1 + m_e/m_u}} \quad (4.25)$$

Seuraavan piikin aiheuttaa taajuudeltaan matalampi P_2 -voima, jota voidaan kuvata kaavalla 4.26 (Schmid et al. 2010):

$$P_2 \approx 0.7 \alpha V \sqrt{k_t m_u} \quad (4.26)$$

Kaavoissa 4.25 ja 4.26

- α on lovikulma
- V on junan nopeus
- k_H on Hertzin kontaktijäykkyys
- m_e on efektiivinen radan massa
- k_t on pyöräkerran yhdistetty jäykkyys
- m_u on vaunun jousittamaton massa

Molemmissa tapauksissa iskuvoimiin vaikuttavat kiskon kulmamuuutos, junan nopeus sekä vaunun jousittamaton massa. Lisäksi P_1 -voiman määrittämiseen tarvitaan radan

massan sekä Hertzin kontaktijäykkyyden arvot ja P_2 -voiman määrittämiseen pyöräkerran yhdistetty jäykkyys.

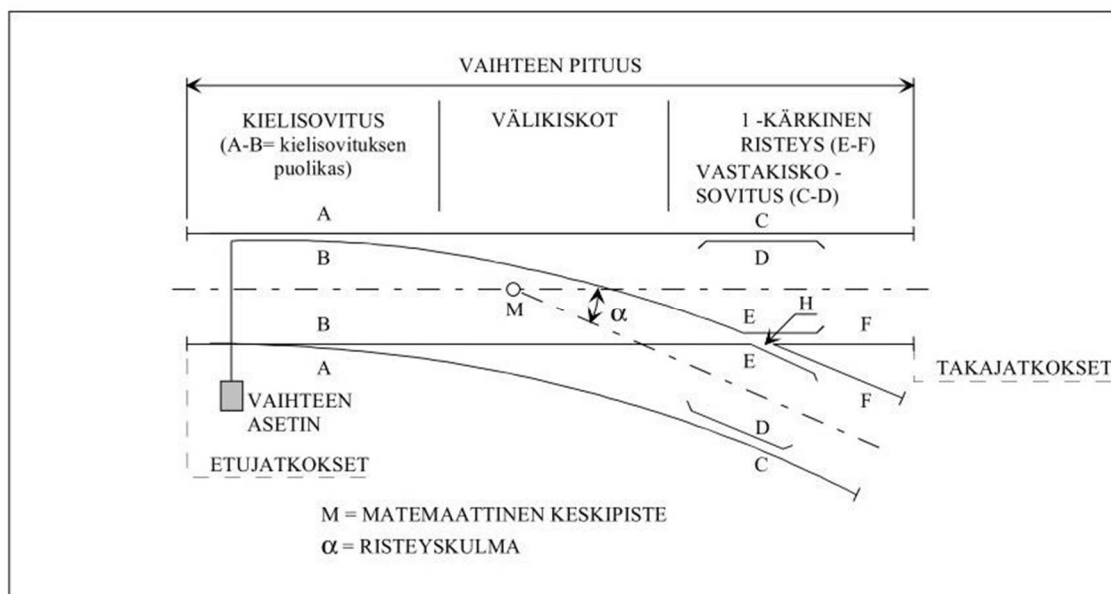
P_2 -iskuvoiman suuruutta voidaan alentaa pienentämällä junan nopeutta, kiskon kulmamuuutosta, vaunun jousittamatonta massaa tai pyöräkerran yhdistettyä jäykkyyttä. P_1 -voiman alentaminen ei ole yhtä helppoa, sillä radan massaa ja Hertzin kontaktijäykkyyttä on vaikea kontrolloida. (Iwnicki 2003; Schmid et al. 2010.) Iskuvoimia P_1 ja P_2 sekä niihin liittyviä raja-arvoja on käsitellyt tarkemmin Samppala (2011) diplomityössään.

4.4 Vaihteen mallintaminen

Rautatievaihteen mallintaminen on melko monimutkainen prosessi, joka käydään tässä vain pääpiirteittäin läpi. Mallintamisprosessi voidaan jakaa neljään osa-alueeseen (Minis 2010):

- radan geometrian mallintaminen
- kiskoprofilin mallintaminen
- pyörä–kisko-kontaktin mallintaminen
- radan jousto-ominaisuuksien arviointi

Radan geometrian mallinnus tarkoittaa käytännössä vaihdetyypistä riippuen erilaisten mittojen määrittämistä vaihteesta. Tyypillinen yksinkertainen rautatievaihde on esitetty kuvassa 4.9. Kuvasta nähdään vaihteen pääosat, joiden sijainti ja mitat tulee tietää radan geometrian mallintamisessa.



Kuva 4.9. Rautatievaihteen pääosat (Ratahallintokeskus 2000).

Kuvassa 4.9 vaihteen muut osat ovat seuraavat (Ratahallintokeskus 2000):

A on tukikisko

B on kieli (kielet muodostavat yhdessä tukikiskojen kanssa kielisovituksen)

C on vastakiskojojen tukikisko

D on vastakisko (vastakiskot muodostavat yhdessä vastakiskon tukikiskon kanssa vastakiskosovituksen)

E on siipikisko (siipikiskot muodostavat yhdessä kärkikiskojojen kanssa 1-kärkisen risteuksen)

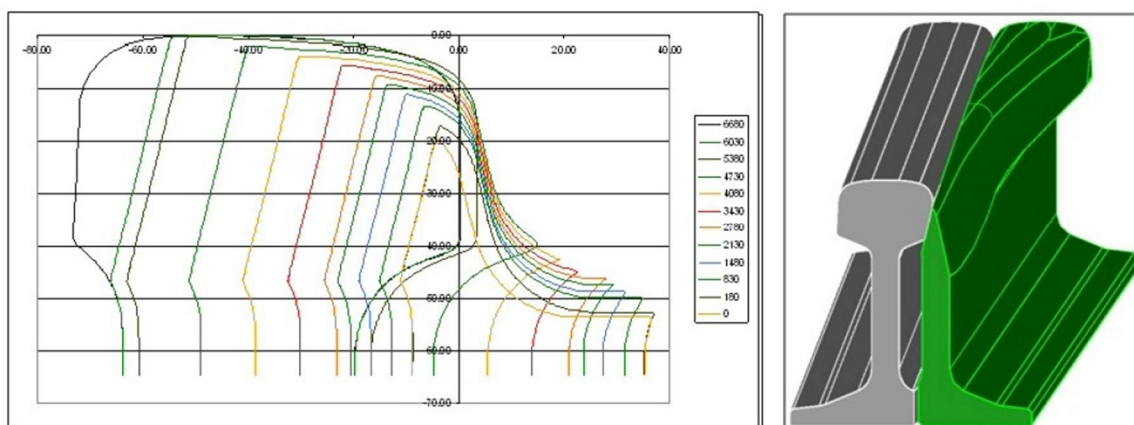
F on kärkikisko (kärkikiskot muodostuvat risteuksen kärkiosasta ja siihen hitsatuista jatkekiskoista)

M on vaihteen matemaattinen keskipiste

H on risteuksen matemaattinen risteyspiste, risteuksen kulkureunojen leikkauspiste

α on risteyskulma, joka ilmaistaan usein tangenttina, esim. 1:9

Rautatievaihteen mallinnuksessa tulee tietää vaihteen eri osien tarkka geometria. Tämä tarkoittaa sitä, että radan geometriatietojen lisäksi vaaditaan tietoa myös rataiskon profiilista. Ratakiskon profiili voidaan mitata mittalaitteella, ja tämä tieto voidaan siirtää suoraan mallinnusohjelmaan. Tämä on helpoin tapa ilmoittaa kiskon profiilitiedot vaihteessa, sillä kiskon profiili muuttuu vaihdealueella merkittävästi. Kiskon profiilin muuttuminen vaihteen kielen sulautuessa tukikiskoon on esitetty kuvassa 4.10.



Kuva 4.10. Ratakiskon profiili ja geometria vaihteessa (Minnis 2010).

Vaihteen mallintamisen kolmantena osana tulee selvittää kiskon ja pyörän väliset kontaktivoimat. Jotta kontaktivoimat saadaan selville, tulee kiskoprofiilin lisäksi olla tiedossa myös pyörän profiili sekä akselikuormitus.

Lisäksi joissain tapauksissa voi olla tarpeellista kiinnittää erityishuomiota raiteen jousto-ominaisuuksiin. Raiteen jousto-ominaisuuksilla on suuri vaikutus kiskon ja pyörän välillä vaikuttaviin dynaamisiin voimiin. Ominaisuudet voivat muuttua selvästi vaihteen eri kohdissa, ja tätä voidaan mallintaa muuttamalla raiteen jousto-ominaisuuksia vaihteen eri osissa.

5 TUTKIMUSMENETELMÄT

Vaihteen epäjatkuvuuskohta aiheuttaa junaan herätteen, jonka on todettu irrottavan junakalustoon kertynyttä lunta ja jäätä. Laskennallisissa ja mittauksiin perustuvissa tutkimuksissa on pyritty selvittämään junakalustoon kohdistuvan herätteen ja lumen irtoamisen välistä yhteyttä. Junan värähtelykäyttäytymistä on tarkasteltu värähtelylaskelmilla, joiden avulla on saatu selville, millaisia kiihtyvyyksiä erilaiset herätteet aiheuttavat junaan. Lisäksi kiskon epäjatkuvuuskohtien ja lumen irtoamisen välistä yhteyttä on tutkittu mittauksien avulla, jotka jakautuvat kahteen eri osioon. Mittausten ensimmäisessä osiossa on seurattu kahta ongelmalliseksi todettua vaihdetta, vaihteesta yli menneitä junia ja junista vaihteisiin irronnutta lunta. Mittausten toisessa osiossa yhteen junakalustoon on kiinnitetty kamerat ja kiihtyvyysanturit, joiden avulla on seurattu kalustoon kohdistuvia herätteitä ja kaluston alustarakenteisiin kertynyttä lunta yhden junamatkan aikana. Samalla on ollut mahdollista selvittää myös herätteiden ja lumen irtoamisen välistä yhteyttä.

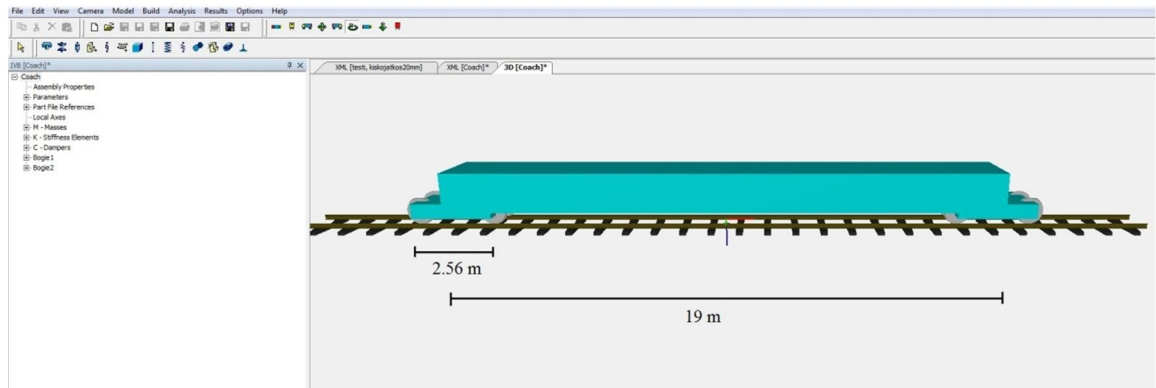
5.1 Värähtelylaskelmat

Työn yhtenä tarkoituksena oli selvittää, millaisia kiihtyvyyksiä erilaiset epäjatkuvuuskohtat aiheuttavat junakalustoon. Raiteen epäjatkuvuuskohtat aiheuttavat pyörään iskuvoiman, jonka suuruutta voidaan arvioida kaavoilla 4.25 ja 4.26. Näiden kaavojen avulla epäjatkuvuuskohtien vaikutusta voitaisiin arvioida käyttämällä vain junan värähtelymallia ja esimerkiksi kuvan 4.8 kaltaisia pyöriin kohdistuvia ajasta riippuvia iskuvoimia. Kaavat pätevät kuitenkin vain kiskossa olevan kulmamuuutoksen suuntautuessa alaspäin, kuten esimerkiksi kisko jatkoskohtien tapauksessa. Kisko jatkoskohdissa iskuvoiman suuruuden on arvioitu vastaavan noin $1,15^\circ$ kulmamuuutosta (Schmid et al. 2010). Vaihteissa tapahtuvaa iskuvoimaa vastaavaa kulmamuuutosta on vaikeampi arvioida. Toisaalta raiteen epäjatkuvuuskohta voi suuntautua myös raiteesta ylöspäin, jolloin iskuvoimien kaavat eivät välttämättä ole päteviä.

Epäjatkuvuuskohtien aiheuttamien vaikutusten laskennassa on siis hyvä ottaa mukaan myös radan värähtelymalli. Radan ja junavaunun värähtelymallien yhdistämisen myötä liikeyhtälöiden laskeminen vaikeutuu selvästi, joten tässä vaiheessa on siirrytty käyttämään valmista dynamiikkaohjelmaa. Dynamiikkaohjelmaan on mallinnettu haluttu junakalusto, kiskoprofiili ja kiskon epäjatkuvuuskohtat. Ohjelmalla ajettiin erilaisten epäjatkuvuuskohtien yli junan nopeutta vaihdellen, ja näin saatiin selville junakaluston värähtelykäyttäytyminen eri tilanteissa.

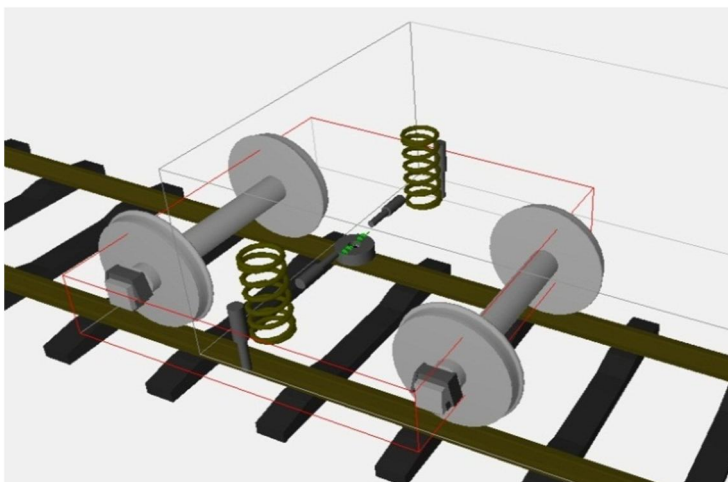
5.1.1 Junakaluston mallintaminen

Vampire-dynamiikkaohjelmalla mallinnettiin kuvan 4.4 värähtelymallia vastaava yksinkertaistettu versio tavallisesta matkustajavaunusta (kuva 5.1). Tämän dynamiikkaohjelman mallit koostuvat aina massoista ja pyöräkerroista, jotka on yhdistetty toisiinsa jousituksilla. Malliin tarvittavat massa- ja jousitustiedot on otettu yksikerroksisen IC-junan tiedoista taulukosta 4.1. Laskuissa käytettiin pyöräkerran massana jousittamatonta kokonaismassaa pyöräkertaa kohti.



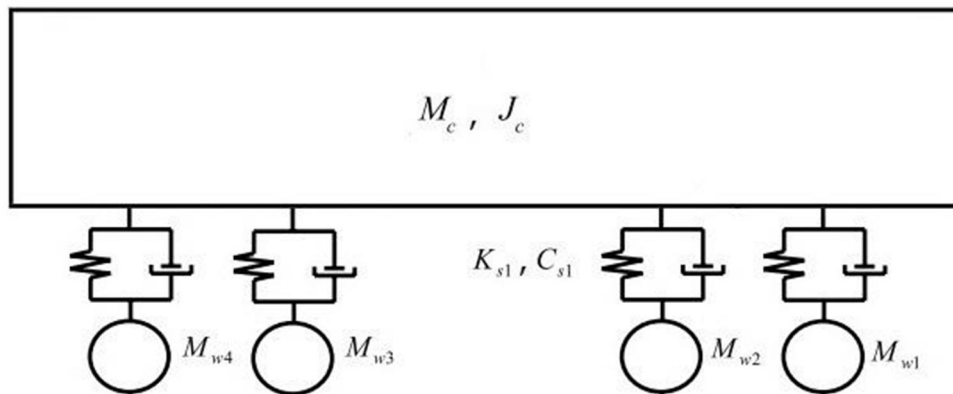
Kuva 5.1. Mallinnettu junakalusto.

Malli koostuu vaunurungosta, kahdesta telistä ja neljästä pyöräkerrasta. Lisäksi mallissa on kuvattu ensiö- ja toisiojousitukset. Ensiöjousituksen jäykkyys- ja vaimennusominaisuudet on mallinnettu jokaiseen laakeripesään sijoitetulla holkkielementillä (*bush element*). Tällä tavoin telin ja pyörien väliset jouset ja vaimennukset saatiin yhdistettyä yhteen elementtiin. Toisiojousitus sisältää kierrejouset, jouston rajoittimet, pysty- ja sivuttaissuuntaiset vaimentimet, kallistuksenvakaimen sekä pitkittäissuuntaisen vetotangon (*traction path*). Kallistuksenvakain ja vetotanko on mallinnettu yhden holkkielementin avulla. Mallin ensiö- ja toisiojousitus on esitetty kuvassa 5.2.



Kuva 5.2. Mallissa käytetty jousitus.

Tavaravaunussa on kolmiosainen teli ja erilainen jousitusjärjestelmä, joten se mallinnetaan hieman eri tavalla. Tavaravaunulle on yksinkertaistuksen vuoksi käytetty kuvan 5.3 mukaista värähtelymallia, jossa kolmiosaisen telin osat on yhdistetty pyöräkertoihin ja vaunurunkoon. Mallissa telin keskiöpalkit on ajateltu osaksi vaunurunkoa, jolloin lastatun vaunun massana on käytetty 95000 kg. Jousittamattomassa massassa on huomioitu pyöräkertojen lisäksi myös telin sivupalkkien massat. Kolmiosaisen telin vaikutus on otettu huomioon muuttamalla pyöräkerran massaa siten, että mallin pystysuuntaiset hitausominaisuudet vastaisivat riittävällä tarkkuudella oikeaa tapausta (Hakulinen et al. 2012). Pyöräkerran massana on siis käytetty 1650 kg, joka kuvaa samalla mallin jousittamatonta massaa.



Kuva 5.3. Tavaravaunun yksinkertainen värähtelymalli.

Tavaravaunun mallinnuksessa pyöräkerran ja vaunurungon välisessä kiinnityksessä on käytetty lineaarisia jousia sekä kitkavaimenninelementtejä. Kitkavaimennin mahdollistaa vaunun vaimennusominaisuuksien muuttumisen kuormituksen mukaan. Mallinnuksessa tarvittavat massa-, jäykkyys- ja vaimennustiedot on lueteltu taulukossa 4.2.

Molempiin malleihin on lisäksi sijoitettu kiihtyvyyssanturit takimmaisen pyöräkerran kohdalle. Matkustajavaunussa antureita on pyöräkerrassa, telissä ja vaunurungossa. Tavaravaunussa anturit on sijoitettu pyöräkertaan ja vaunurunkoon. Anturit mittaavat kiihtyvyyttä radan suunnassa sekä vaaka- ja pystysuunnissa.

5.1.2 Oinaisvärähtelymuodot

Mallinnuksen jälkeen vaunun ominaisvärähtely kannattaa selvittää ominaisvärähtelyanalyysin avulla. Oinaisvärähtelyanalyysi kertoo vaunun ominaisvärähtelytaajuuudet ja niitä vastaavat ominaisvärähtelymuodot. Analyysin tekeminen on hyvä keino tarkistaa mallin toimivuus, sillä ominaisvärähtelyanalyysin suorittaminen todistaa, että mallin massa-, jäykkyys- ja vaimennusmatriisit ovat kunnossa. Oinaisvärähtelymuotojen animaatiosta pystyy myös helposti tarkistamaan, onko malli oikealla tavalla tuettu. Samalla selviää, ovatko mallin eri osat kiinnitetty toisiinsa järkevällä tavalla.

Ominaisvärähtelyanalyysi tehtiin matkustajavaunun esimerkkinä käytetylle Ex-vaunulle ja tavaravaunun esimerkkinä käytetylle Vok-vaunulle. Matkustajavaunun mallissa on 32 vapausastetta ja siten 32 ominaisvärähtelymuotoa ja -taajuutta. Tavaravaunun mallissa vapausasteita on 22. Vapausasteiden lukumäärä on siis molemmissa malleissa selvästi suurempi kuin aiemmin kuvassa 4.4 esitetyssä yksinkertaisessa laskentamallissa, jossa vapausasteita oli kymmenen. Kaikissa malleissa pitäisi kuitenkin olla tunnistettavissa kuvassa 4.3 esitetyt vaunurungon ominaisvärähtelymuodot.

Ominaisvärähtelyanalyysi kannattaa suorittaa hyvin pienellä nopeudella, jotta vaunun muu värähtely ei sotke ominaisvärähtelyitä. Tässä tapauksessa vaunun nopeutena on käytetty $v = 0,01$ m/s.

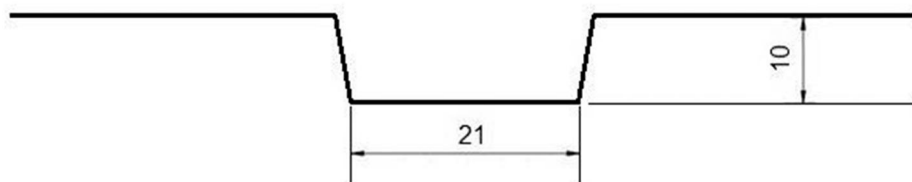
5.1.3 Kiskojaatkos

Dynamiikkaohjelmalla voidaan mallintaa erilaisia raiteen epäjatkuvuuskohtia, joista kiskojaatkoksen mallintaminen on yksinkertaisinta. Kiskojaatkoksen päiden väliin jää kiskojaatkoskohdissa jatkosrako. Kiskon jatkosrakoja maksimiarvot on kerrottu taulukossa 5.1.

Taulukko 5.1. Jatkosrakoja teoreettiset maksimiarvot (Ratahallintokeskus 2002).

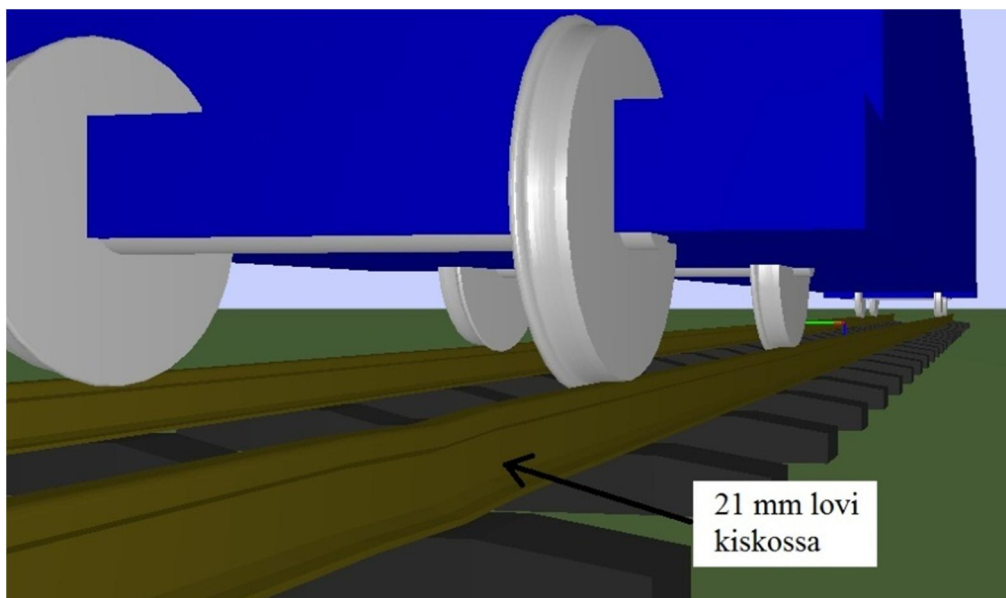
Kisko	Jatkosraon maksimiarvo [mm]	
	Nimellinen	Nimellinen + toleranssi
K30	18	23
K43	18	23
54 E1	21	26
60 E1	21	23
K60	18	24

Ohjelmassa epäjatkuvuuskohtat tulee ilmoittaa kiskon epätasaisuustiedoston (*rail irregularity file*) avulla. Tiedostoon on ilmoitettu tässä tapauksessa epäjatkuvuuskohtan sijainti ja kiskon pystysuuntainen poikkeama. Jatkosrakoa on mallinnettu 21 mm pituisella lovella molemmissa kiskoissa (kuva 5.4).



Kuva 5.4. Kiskojaatkoksen malli.

Loven syvyytenä on käytetty 10 mm. Loven syvyys on riittävä kiskoatkoksen mallintamisessa, sillä halkaisijaltaan 920 mm oleva pyörä uppoaa 21 mm pitkään loveen vain 0,12 mm. Kuvassa 5.5 on esitetty ohjelman animaatiomallista otettu kuva mallinnetusta kiskoatkokskohdasta.



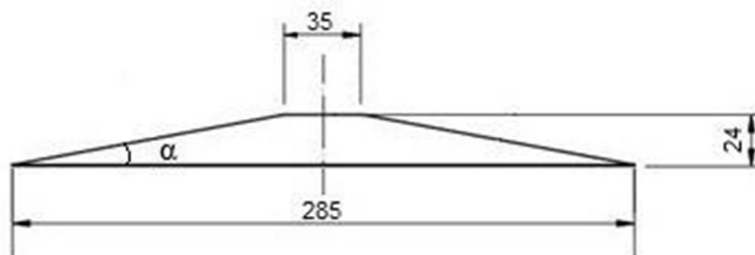
Kuva 5.5. *Jatkosraon mallintaminen kiskossa.*

Animaatiomallissa (kuva 5.5) kiskon jatkosrako näyttää painumalta kiskossa, sillä kiskon pystysuuntainen poikkeama koskee koko kiskoprofiilia. Kiskosta ei siis ole poistunut materiaalia loveen kohdalta, vaan kiskoprofiili on vain siirtynyt loveen kohdalla 10 mm alaspäin.

5.1.4 Kiskopomppu

Ohjelmalla on haluttu mallintaa myös kiskon pinnasta ylöspäin suuntautuva epäjatkuvuuskohta, jotta saadaan selville ylöspäin suuntautuvan kulmamutoksen vaikutus junan värähtelykäyttäytymiseen. Epäjatkuvuuskohtan mallina on käytetty telien jousituksen vapauttamiseen käytettyä tšekkiläistä kiskopomppua, josta kerrotaan tarkemmin luvussa 5.4. Kiskopomppun ideana on testata raiteesta ylöspäin suuntautuvaa raiteen epäjatkuvuuskohtaa (kuva 5.6). Mallissa käytetyn pomppun korkeus kiskon yläpinnasta on 24 mm ja kulmamutos α on noin 11° . Kiskopomppu on kokonaisuudessaan 285 mm pitkä.

Epäjatkuvuuskohta on mallinnettu kiskon pystysuuntaisen poikkeaman avulla. Molemmat kiskot nousevat siis 24 mm korkeammalle ja tämän jälkeen 285 mm myöhemmin palaavat takaisin normaalille korkeudelle.



Kuva 5.6. Kiskopompun malli.

Näiden kahden erityyppisen epäjatkuvuuskohdan tapauksessa on selvitetty, millaisia kiihtyvyyksiä ne aiheuttavat matkustaja- ja tavaravaunuihin eri nopeuksilla. Tämän perusteella selviää, kumman tyyppisellä epäjatkuvuuskohdalla on suurempi vaikutus junan värähtelykäyttäytymiseen. Epäjatkuvuuskohdat on sijoitettu mallinnuksessa molempiin kiskoihin samalle kohdalle, jotta mallinnustilanne vastaisi kolmanneksi mittaukseksi suunniteltua raiteen epäjatkuvuuskohdan vaikutusten tarkastelua (luku 5.4). Epäjatkuvuuskohdan sijoittaminen vain toiseen kiskoon aiheuttaisi junan värähtelykäyttäytymiseen merkittävän eron tähän tilanteeseen verrattuna.

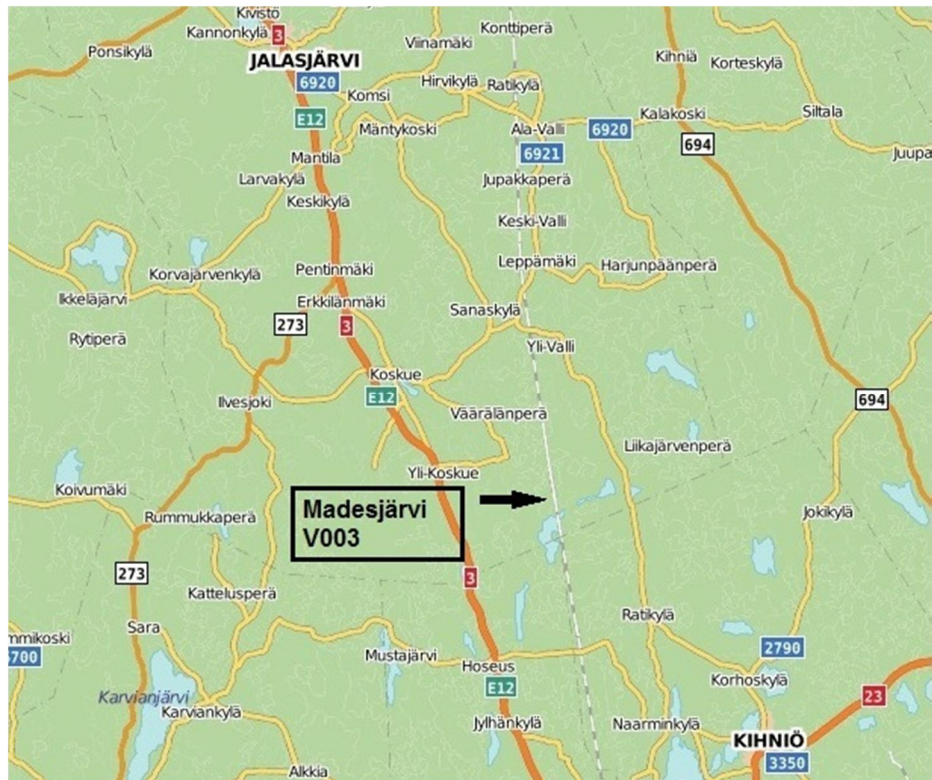
5.2 Lumen irtoamisen seuranta valikoiduissa vaihteissa

Vaihteiden aiheuttaman herätteen vaikutuksien seurantaa varten valittiin kaksi vaihdetta, joiden toiminnassa on havaittu usein häiriöitä. Häiriöitä voi aiheuttaa esimerkiksi yli kulkevasta junasta irronnut lumimassa, joka ajautuu vaihteen kielen ja tukikiskon väliin. Tällöin vaihde ei pääse liikkumaan halutulla tavalla. Vaihteita ja niihin irronnutta lunta seurattiin kameroiden avulla. Tarkoituksena oli selvittää, miten esimerkiksi junan nopeus ja vallitsevat sääolosuhteet vaikuttavat junasta irronneen lumen määrään.

5.2.1 Seurattavien vaihteiden valinta

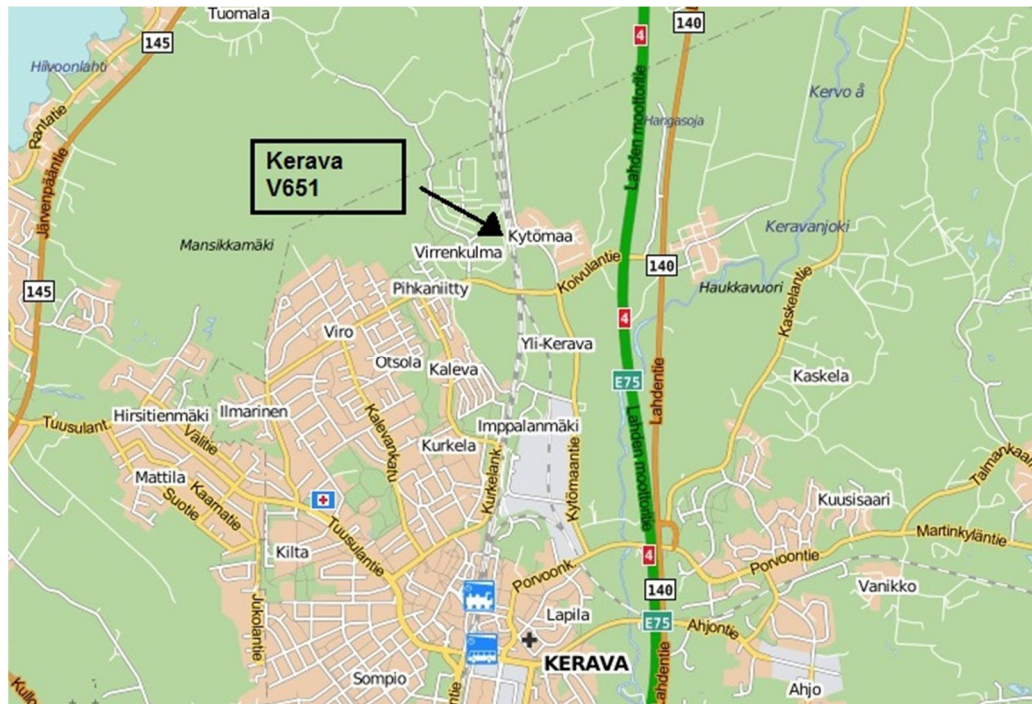
Kunnossapitäjät ovat havainneet, että osa vaihteista tarvitsee huoltoa useammin kuin toiset. Seurattavat vaihteet valittiinkin niiden vaihteiden joukosta, joissa oli havaittu keskimääräistä enemmän kunnossapito-ongelmia talviaikaan.

Ensimmäiseksi seurattavaksi vaihteeksi valittiin Madesjärvellä sijaitseva vaihde V003. Vaihde sijaitsee kuvan 5.7 mukaisesti Tampere–Seinäjoen rataosuudella, noin 30 kilometriä Parkanosta pohjoiseen. Madesjärven vaihteesta kulkee yleensä noin 30 junaa päivässä, ja junia kulkee pohjoisen ja etelän suuntiin suunnilleen yhtä paljon. Vaihde on sekaliikennealueella, eli siitä kulkee sekä matkustaja- että tavaraliikennettä. Madesjärven vaihteessa on ollut ongelmia erityisesti lumisuojujen rikkoontumisen vuoksi. Lumisuojujen rikkoontumisen on nähty johtuvan vaihteen yli kulkevasta junasta pudonneesta lumesta.



Kuva 5.7. Madesjärven vaihteen sijainti.

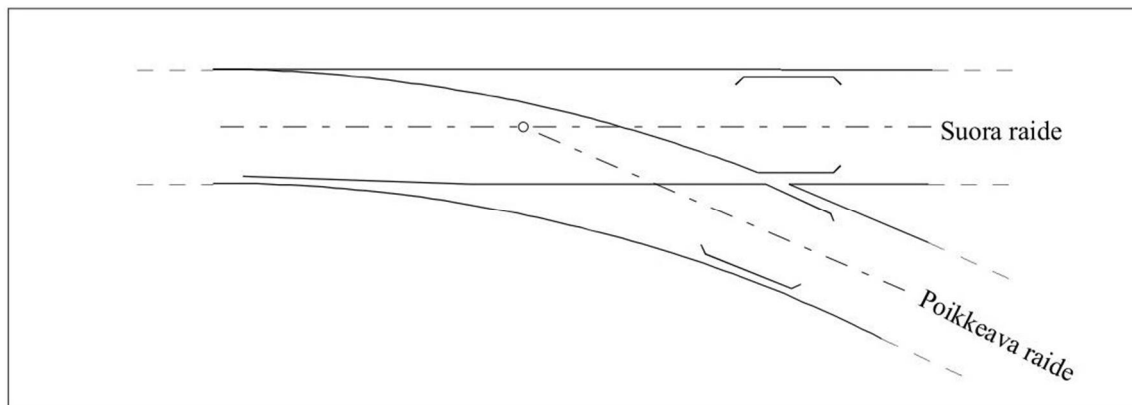
Toiseksi seurattavaksi vaihteeksi valittiin Keravan Kytömaan vaihde V651. Vaihde sijaitsee Kerava–Järvenpää-rataosuudella noin kolme kilometriä Keravan keskustasta pohjoiseen (kuva 5.8).



Kuva 5.8. Keravan vaihteen sijainti.

Keravan vaihteesta kulkee yleensä noin 50 junaa päivässä. Vaihteesta kulkee sekä lähiliikenne- että kaukoliikennejunia, mutta ei juurikaan tavarajunia.

Madesjärven ja Keravan vaihteet ovat niin sanottuja yksinkertaisia vaihteita. Yksinkertaisessa vaihteessa on kuvan 5.9 mukaisesti suora ja poikkeava raide. Näitä vaihteita merkitään lyhenteellä YV.



Kuva 5.9. Yksinkertaisen vaihteen suora ja poikkeava raide. (Ratahallintokeskus 2000)

Molemmat seurattavat vaihteet ovat tyyppiä YV60-900-1:18-V. Tämä merkintä tarkoittaa sitä, että poikkeavan raiteen kaarresäde on molemmissa vaihteissa 900 metriä ja poikkeava raide kaartuu vasemmalle. Kun poikkeavan raiteen kaarresäde on yli 300 metriä, vaihte luokitellaan pitkäksi vaihteeksi. Madesjärven ja Keravan vaihteet ovat siis molemmat pitkiä vaihteita. Lisäksi molempien vaihteiden risteyssuhde on 1:18.

Madesjärvellä juna on kulkenut toisesta vaihteesta juuri ennen kuvattavaan vaihteeseen saapumista. Etelän suuntaan kulkevilla junilla edellinen vaihte on ollut noin kilometri ennen kuvattavaa vaihdetta, pohjoisen suuntaan kulkevilla edellisellä vaihteella ja kuvattavalla vaihteella on eroa vain noin 100 metriä. Osa junan alustaan kertyneestä lumesta on siis voinut irrota jo edellisen vaihteen kohdalla. Kunnossapitäjän kokemusten mukaan kuitenkin juuri valitun vaihteen suhteen on ollut eniten ongelmia. Keravan vaihteessa V651 lähes kaikki junat kulkevat etelän suuntaan, jolloin edellisen vaihteen ja kuvattavan vaihteen välillä on noin neljä ratakilometriä.

Madesjärven ja Keravan vaihteen kohdalla rataosuuden nopeusrajoitus on 200 km/h. Suurin sallittu nopeus poikkeavalle raiteelle ajettaessa on kummassakin vaihteessa 80 km/h. Suoraan ajettaessa suurin sallittu nopeus tämän tyyppisessä vaihteessa on jopa yli 200 km/h, eli tässä tapauksessa suurin sallittu nopeus on suoraan ajettaessa nopeusrajoituksen mukainen 200 km/h. (Ratahallintokeskus 2000.)

5.2.2 Seurantamenetelmä

Vaihteiden seuranta aloitettiin Madesjärvellä 9.2.2012 ja Keravalla 16.2.2012. Seurantaa jatkettiin kevään ajan lumen sulamiseen asti. Vaihteeseen asennettiin kamerat, jotka ottivat kuvan junasta sen ylittäessä vaihteen. Kamerat ottivat kuvan vaihteesta myös minuutti ensimmäisen kuvan jälkeen. Näitä jokaisen junan jälkeen otettuja kuvia vertailtaessa selviää, onko kuvien välissä menneestä junasta pudonnut lunta vaihdealueelle.

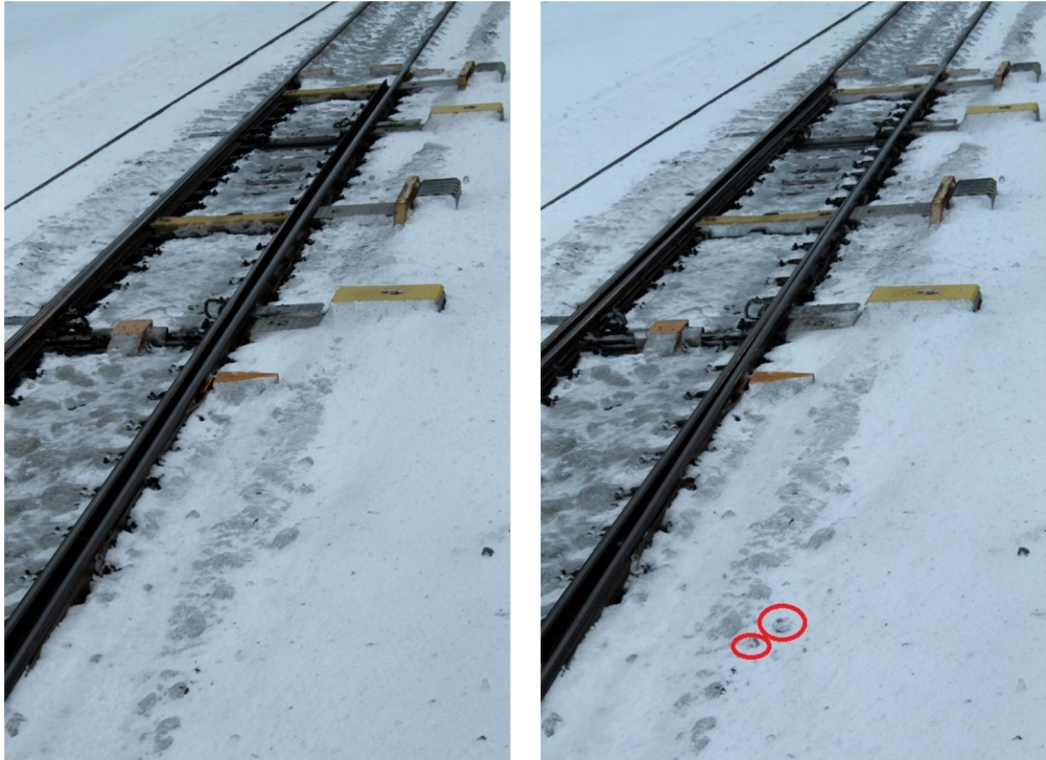
Jokaisesta junasta kirjattiin ylös junan kulkuaika, suunta, nopeus, ulkoilman lämpötila, sääolosuhteet sekä junasta irronneen lumen määrä. Lisäksi junasta otetusta kuvasta oli tarkoitus selvittää junan tyyppi sekä arvioida junan ympärillä pölyävän lumen määrää.

Lumen irtoamista seurattiin vertailemalla edellisen junan jälkeen otettua kuvaa tarkasteltavan junan jälkeen otettuun kuvaan. Kuvien tarkastelussa on pyritty erottamaan tuulen tai junan aiheuttaman ilmavirran mukana siirtyneet lumimassat niistä, jotka ovat irronneet yli menneestä junasta. Tämä ei kuitenkaan ollut mahdollista etenäkään silloin, kun lumimassa siirtyi tuulen mukana kuvaan kuvan ulkopuolelta. Oletuksena on siis ollut, että kaikki kuvaan ilmestyneet lumimassat ovat pudonneet yli menneestä junasta.

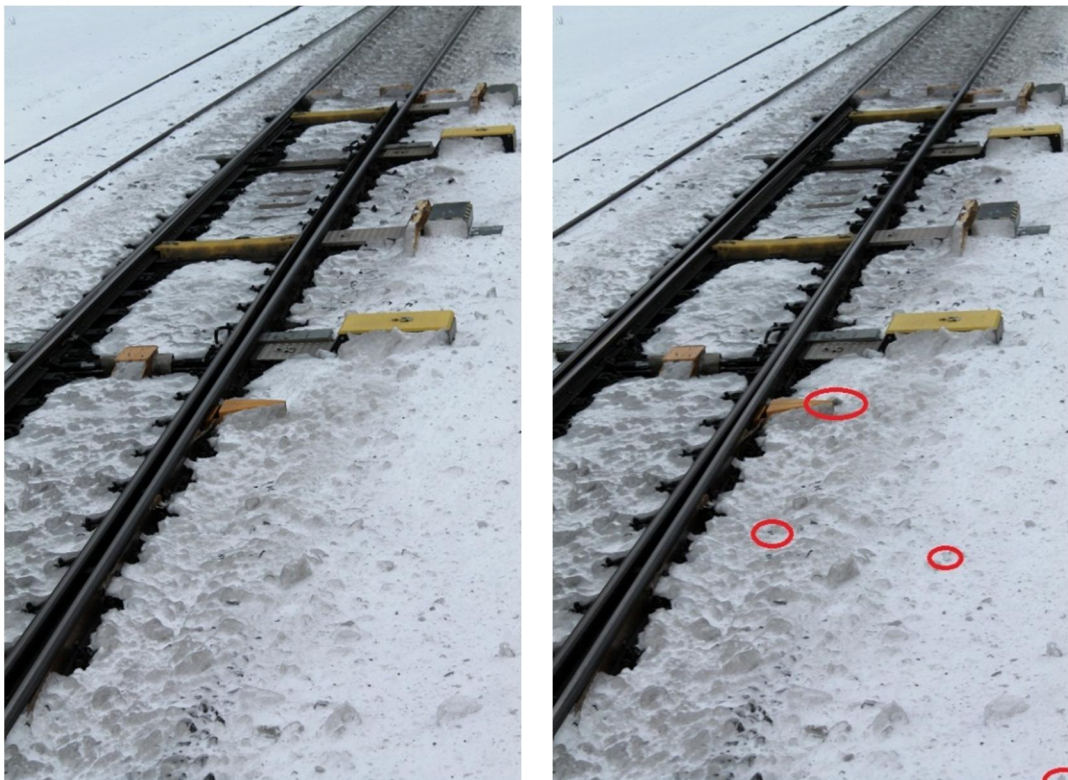
Junasta irronneen lumen määrää arvioitiin asteikolla 0–3. Mikäli lunta on pudonnut vain muutamia hyvin pieniä palasia tai yksi hiukan isompi, on määrää arvioitu luvulla 1. Jos pieniä irronneita lumipalasia on ollut enemmän tai isompia korkeintaan kaksi, on irronneen lumen määrää arvioitu luvulla 2. Luku 3 viittaa siihen, että isompia irronneita lumipalasia on ollut enemmän kuin kaksi tai pieniä lumipalasia on ollut huomattava määrä. Mikäli kuvissa ei ole tapahtunut muutosta tai lumipalasten siirtymien on arvioitu johtuvan vain tuulesta tai junan ilmavirrasta, on irronnutta lumimäärää arvioitu luvulla 0. Kuvissa 5.10–5.12 on esimerkkejä lumen määrän arvioinneista Madesjärvellä.



Kuva 5.10. Esimerkki lumen irtoamisesta tasolla 1. Madesjärvi, vaihde V003, 11.3.2012.



Kuva 5.11. Esimerkki lumen irtoamisesta tasolla 2. Madesjärvi, vaihde V003, 28.2.2012.



Kuva 5.12. Esimerkki lumen irtoamisesta tasolla 3. Madesjärvi, vaihde V003, 18.2.2012.

Kuvista pystytään luonnollisesti havaitsemaan vain kuvan alueella tapahtuneet muutokset irronneen lumen suhteen. Mikäli junasta on irronnut lunta heti vaihdealueen jälkeen, sitä ei voida havaita eikä siten myöskään huomioida tuloksissa.

5.2.3 Mittauslaitteet

Vaihteisiin sijoitettiin valokuvaukseen pohjautuva automaattinen kuvausjärjestely, joka kuvasi jokaisen vaihteen ylittävän junan sekä vaihteen junan ylityksen jälkeen. Kaksi kameraa sijoitettiin Madesjärvellä kuvan 5.13 mukaisesti. Kameroina käytettiin Canon EOS 1000D -merkkisiä digitaalisia järjestelmäkameroita, joiden ympärille rakennettiin sadesuoja. Kamerrat yhdistettiin viereiseen tietokoneeseen, ja kuvat siirrettiin tietokoneen etähallintaohjelman tiedostonsiirto-toiminnan avulla Madesjärven tietokoneesta Tampereelle. Vastaava kuvausjärjestely tehtiin myös Keravan vaihteeseen.



Kuva 5.13. Madesjärven vaihteen kameroiden asennus.

Lisäksi kummassakin vaihteessa oli automaattinen mittausjärjestely junan nopeuden ja suunnan sekä ulkoilman lämpötilan selvittämiseksi. Junan nopeus ja suunta selvitetiin junan akselipainoa mittaavien voima-antureiden avulla.

5.3 Lumen kertymisen ja kiihtyvyyksien seuranta valikoidussa kalustossa

Lumen ja jään irtoamisen kannalta on olennaista, mihin kohtiin junan alustarakennetta lunta ja jäätä kertyy eniten. Tämän selvittämiseksi kehitettiin kuvausjärjestelmä, jolla

voidaan seurata lumen ja jään kertymistä valikoidussa kalustossa. Tarkoituksena oli selvittää muun muassa sääolosuhteiden vaikutus lumen kertymiseen ja kertymisen kannalta kriittisimmät alueet junan alustarakenteessa. Samalla oli tarkoitus tarkkailla, minkälaisissa tilanteissa lumi irtaantuu junasta, ja minkälaisia kiihtyvyyksiä junaan tällöin kohdistuu.

5.3.1 Kaluston valinta

Tarkoituksena oli toteuttaa seurantakuvaus ongelmalliseksi arvioidulle kalustoyksikölle. Esimerkiksi Pendolino-junilla on ollut paljon ongelmia talviliikenteessä, joten kamera-seuranta olisi ollut hyvä toteuttaa tällaisessa ongelmallisessa kalustossa. Käytännön syistä seurattavaksi kalustoksi valittiin kuitenkin mittausvaunu A17, johon kameroiden ja antureiden asennus oli järjestettävissä (kuva 5.14).



Kuva 5.14. Mittausvaunu A17 ja vaunun alustaan asennetut kamerat.

Mittausvaunussa oli valmiina läpiviennit ja sähkönsyöttö, ja lisäksi kameroiden kiinnitys vaunun korkeaan alustaan onnistui helpommin kuin matalaan Pendolinoon. Mittausvaunu A17 vastaa rakenteeltaan pikajunavaunua, mutta sen massa- ja jousitusominaisuudet poikkeavat tavallisesta matkustajavaunusta.

5.3.2 Seurantamenetelmä

Mittausvaunun alle sijoitettiin videokamerat, joiden avulla pystyttiin seuraamaan lumen kertymistä junan alustaan matkan aikana (kuva 5.15). Lisäksi samaan vaunuun sijoitettiin kiihtyvyyssanturit, jotka kertoivat junan pyöräkertaan, teliin ja vaunuun kohdistuneet

kiihtyvyydet matkan aikana. Näin mahdollistui junaan kohdistuvan kiihtyvyyden ja lumen irtoamisen välisen yhteyden tarkastelu.



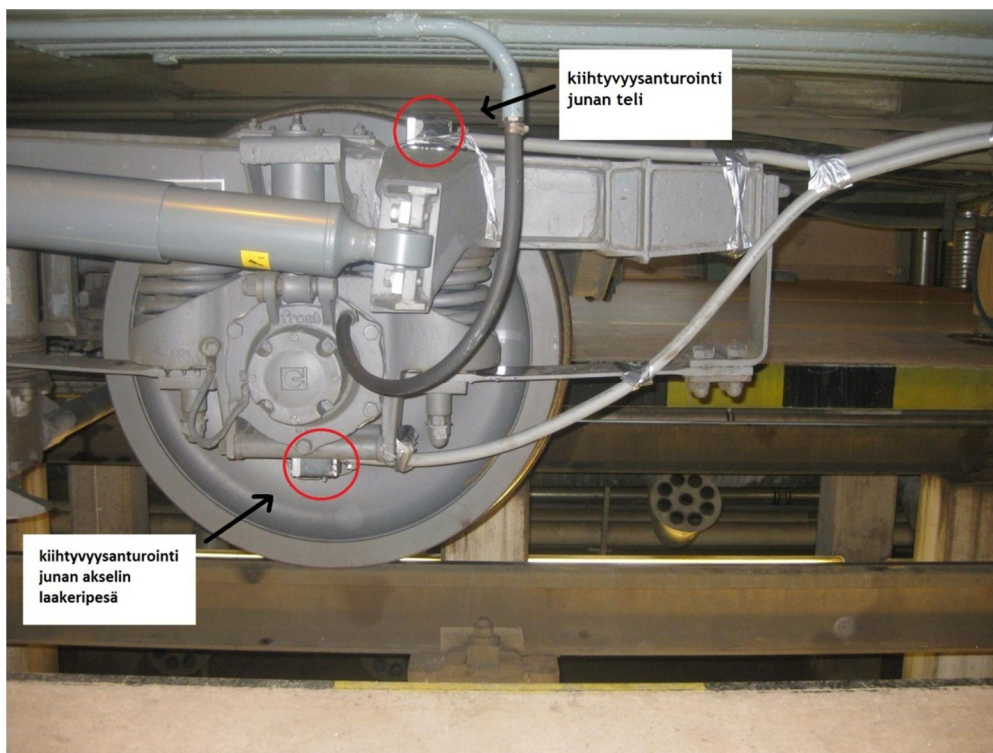
Kuva 5.15. Mittausvaunun alle sijoitetut videokamerat, suojakotelot ja valaistus.

Mittausvaunu sijoitettiin Intercity5-junan perään matkalle Helsinki–Joensuu–Helsinki. Mittaukset tehtiin torstaina 23.2.2012, jolloin IC5 lähti Helsingistä kello 12.52 ja saapui Joensuuhun kello 17.47. Juna lähti Joensuusta takaisin kello 18.18 ja saapui Helsinkiin kello 23.08. Mittauspäivänä lämpötila oli 0°C–1°C, eli hieman nollan asteen yläpuolella. Helsingissä oli heikkoa lumisadetta ja Joensuussa puolipilvistä (Freemeteo 2012).

Kamerakuva ja kiihtyvyydestiedot yhdistettiin paikkaan GPS:n avulla. Lumen irrotaessa pystyttiin siis selvittämään, missä lumen irtoaminen tapahtui ja minkälaiset kiihtyvyydet vaunuun tällöin vaikuttivat. Tällä menetelmällä oli mahdollista selvittää, irtoaako lumi junasta useimmiten juuri vaihteen kohdalla. Toisaalta kamerakuvan avulla oli myös mahdollista selvittää, mihin lunta alkaa kerääntyä ja vaikuttaako lumen kerääntymiseen selvästi esimerkiksi junan nopeus tai lumen pölyäminen.

5.3.3 Mittauslaitteet

Mittausvaunuun sijoitettiin kahdeksan pietsosähköistä kiihtyvyyssanturia takimmaisen pyöräkerran kohdalle. Junavaunuun ja junan teliin sijoitettiin kiihtyvyyssanturit pystyyn, poikittain sekä radan pituussuuntaan. Junan takimmaisen pyöräkerran akseliin sijoitettiin kiihtyvyyssanturit vain poikittain ja pystyyn, sillä radan suuntaan sijoitettua kiihtyvyyssanturia ei katsottu akselissa tarpeelliseksi. Antureiden sijoittelu on merkitty kuvaan 5.16.



Kuva 5.16. Kiihtyvyyssantureiden paikat junan telissä ja pyöräkerrassa.

Kuvassa 5.16 näkyvät sekä junan telin että junan pyöräkerran antureiden sijainnit. Junan pyöräkerran anturit kiinnitettiin junan akselin laakeripesään. Junavaunun kiihtyvyyssanturit sijoitettiin telin kohdalle junavaunun sisäpuolelle. Junaan sijoitettujen kiihtyvyyssantureiden mittausalueet olivat pyöräkerrassa ± 1000 g, telissä ± 100 g ja vaunussa ± 10 g.

Anturit sijaitsivat menomatkalla vasemmalla puolella vaunun takimmaisessa pyöräkerrassa, joka ei toiminut ohjaavana pyöräkertana. Paluumatkalla anturoitu pyöräkerta sijaitsi etummaisena, jolloin kyseinen pyöräkerta toimi ohjaavana pyöräkertana.

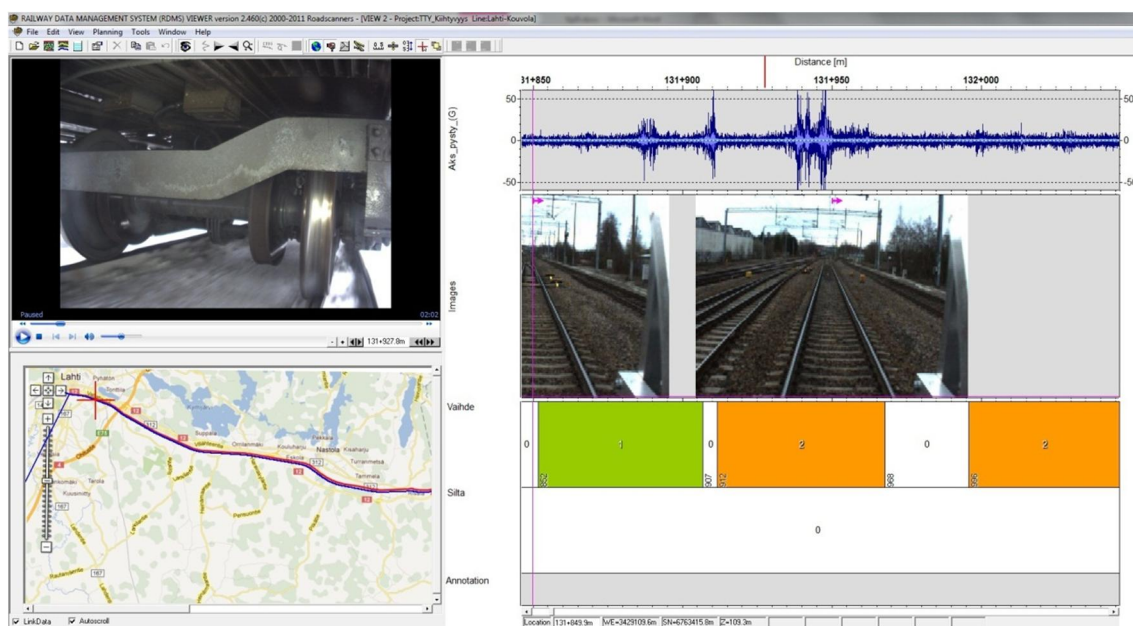
Mittauksissa käytetyt videokamerat sijoitettiin kuvan 5.14 mukaisesti kuvaamaan junan alustaa. Kamerate kuvasivat menomatkalla junan kulkusuunnasta taaksepäin ja paluumatkalla junan kulkusuuntaa kohti. Videokamerat sijoitettiin junan alustaan suojakoteloihin, jotta ne eivät vaurioituisi matkan aikana.

5.3.4 Kiihtyvyyksien tarkastelu

Työssä oli tarkoitus selvittää, minkälaisia kiihtyvyyksiä erilaiset epäjatkuvuuskohdat aiheuttavat vaunurunkoon ja teliin. Huomiota kiinnitettiin erityisesti erilaisten vaihdetyyppien aiheuttamiin kiihtyvyyksiin. Näissä mittauksissa selvisi samalla, millaisia keskimääräisiä kiihtyvyyksiä liikkeellä olevaan junaan kohdistuu koko junamatkan aikana.

Kiihtyvyyssdata liitettiin kamerakuvaan ja GPS-tietoihin Roadscanners Oy:n Railway Data Management System (RDMS) -ohjelmalla, jolloin kiihtyvyyss tiedot pystyttiin yhdistämään erilaisiin raiteen epäjatkuvuuskohtiin (kuva 5.17). Tämän avulla saatiin sel-

ville erilaisten vaihteiden aiheuttamat keskimääräiset kiihtyvyydet mittausvaunussa. Kiihtyvyydestarkastelu tehtiin menomatkalta, jolloin ulkona oli vielä kohtuullisen valoisaa ja kamerakuva siten selkeämpi.



Kuva 5.17. Kiihtyvyyssarvot, kamerakuva ja GPS-tiedot yhdistettynä RDMS-ohjelmalla.

Kuvan 5.17 vasemmassa ylälaidassa on näkyvillä junan alapuolelle sijoitetun kameras tallentamaa kuvaa matkalta. Kuvan 5.17 vasemman alalaidan kartasta nähdään junan kulkureitti ja sijaintitiedot. Kiihtyvyydestiedot junan vaunusta, telistä ja pyöräkerrasta ovat kuvan 5.17 oikeassa ylälaidassa. Lisäksi ohjelmaan on merkitty vaihteiden, siltojen ja tasoristeysten sijainnit.

Kiihtyvyydestietoja tarkasteltiin aluksi yleisesti menomatkalla koko Helsinki–Joensuuosuudella, jolloin saatiin arvioitua kiihtyvyyksien suuruusluokkia suoralla rataosuudella ja vaihteissa. Samalla saatiin selville, kuinka usein junakalustoon kohdistuvat normaali-väärähtelystä poikkeavat kiihtyvyydet ilmenevät juuri vaihteiden kohdalla. Tämän jälkeen keskityttiin tarkastelemaan kahden erityyppisen vaihteen aiheuttamia kiihtyvyyksiä junavaunussa, telissä ja pyöräkerrassa. Jokaisesta vaihteesta kirjattiin ylös kiihtyvyydestietojen lisäksi vaihteen numero ja sijainti, vaihdetyyppi, vaihteen asennusvuosi sekä junan nopeus. Lisäksi merkittiin kulkeeko juna myötä- vai vastavaihteeseen ja suoraan vai poikkeavalle radalle.

Tarkasteltaviksi vaihteiksi valikoituivat pitkistä vaihteista YV60-900-1:18 ja lyhyistä vaihteista YV60-300-1:9. Tarkasteltavia vaihteita haluttiin saada useita samaan tarkasteluluokkaan, ja nämä vaihdetyypit olivat yleisimpiä vaihteita tarkastelumatkalla. Kummatkin tarkasteltavat vaihteet ovat kuvan 5.9 mukaisia yksinkertaisia vaihteita. Lisäksi ensimmäinen vaihdetyyppi vastaa lumen irtoamisen seurantaan valittuja Madesjärven ja Keravan vaihteiden vaihdetyyppejä.

Kerava–Lahti-rataosuudella suurin sallittu nopeus on 220 km/h, Lahti–Lappeenranta-osuudella 160 km/h ja Lappeenranta–Joensuu-osuudella 140 km/h. Mit-

tausvaunu oli sijoitettu IC5-junan perään, joten vaunu kulki korkeintaan nopeudella 140 km/h. Kaikki rataosuudet kuljettiin siis suunnilleen samalla nopeudella. Siksi eri osuuk-sien kiihtyvyystietoja voidaan verrata toisiinsa, ja tiedoista on mahdollista päätellä jo-tain myös eri rataosuuksien kunnosta.

5.4 Raiteen epäjatkuvuuskohdan vaikutusten tarkastelu

Kolmantena mittauksena suunniteltiin tehtäväksi raiteen epäjatkuvuuskohdan vaikutus-ten tarkastelu. Mittauksen lähtökohtana oli tarkastella kiskoon rakennetun epäjatku-vuuskohdan vaikutusta junakaluston värähtelyihin ja kalustoon kertyneen lumen ir-toamiseen. Tarkasteltavaksi epäjatkuvuuskohdaksi valikoitui luvussa 3 mainittu koho-a-mamalli c (kuva 5.18).



Kuva 5.18. Kiskon epäjatkuvuuskohta.

Tarkoituksena oli selvittää, millainen epäjatkuvuuskohta vastaa herätevaikutukseltaan rautatievaihdetta ja irrottaako tämän tyyppinen epäjatkuvuuskohta tehokkaasti junan alustaan kertynyttä lunta. Mikäli epäjatkuvuuskohta toimii hyvin lumen irrottajana, täl-laisia kiskopomppuja voitaisiin käyttää lumen hallittuun irrottamiseen vaihdealueen ul-kopuolella.

Jotta lumen irtoamista olisi voitu tarkastella, olisi mittauspaikalla pitänyt olla käytet-tävissä hyvin lumisia vaunuja. Mittausten mahdollistuttua tarpeeksi lumisia päiviä ei talven ja kevään aikana enää tullut, joten mittauksia ei lopulta päästy tekemään. Mitta-usjärjestelyt mahdollisesti tulevia mittauksia varten on kuitenkin mietitty jo valmiiksi.

5.4.1 Mittausjärjestelyt

Epäjatkuvuuskohtia suunniteltiin testattavaksi suljetulla raidealueella, jossa lumisia vaunuja olisi ajettu kiskoihin liitettyjen epäjatkuvuuskohtien yli. Epäjatkuvuuskohdat olisi asennettu molempiin kiskoihin samalle kohdalle ja herätevaikutukseltaan kasva-vaan järjestykseen. Erikokoiset epäjatkuvuuskohdat aiheuttavat kalustoon erilaisia isku-ja, ja iskujen vaikutusta vaunun eri osiin oli tarkoitus seurata kiihtyvyyssantureilla. Vau-nun alustaan olisi asennettu kuvausjärjestelmä, jonka avulla olisi saatu selville, mistä alustan osasta lunta irtoaa ja kuinka suuria lumimääriä herätteet irrottavat. Toisaalta ir-ronnutta lunta oli tarkoitus tarkastella myös kuvaamalla rata-aluetta herätteiden kohdalta ennen ja jälkeen junan ylityksen ja vertailemalla kuvia toisiinsa.

Mittaustuloksista oli tarkoitus analysoida kalustoon syntyneitä värähtelyitä ja niiden yhteyttä lumen irtoamiseen. Kamerakuvan avulla olisi selvitetty, mistä junan alustara-

kenteen osasta lumi tarkalleen ottaen irtoaa. Tarkoituksena oli selvittää herätteen aiheuttaman kiihtyvyyden ja lumen irtoamisen välinen yhteys. Lumen ja jään irtoamiseen vaikuttavat merkittävästi ympäröivät olosuhteet, joten mittauksen aikainen lämpötila, ilmankosteus ja sääolosuhteet olisi merkitty ylös. Myös vaunujen ajohistoria oli tarkoitus selvittää.

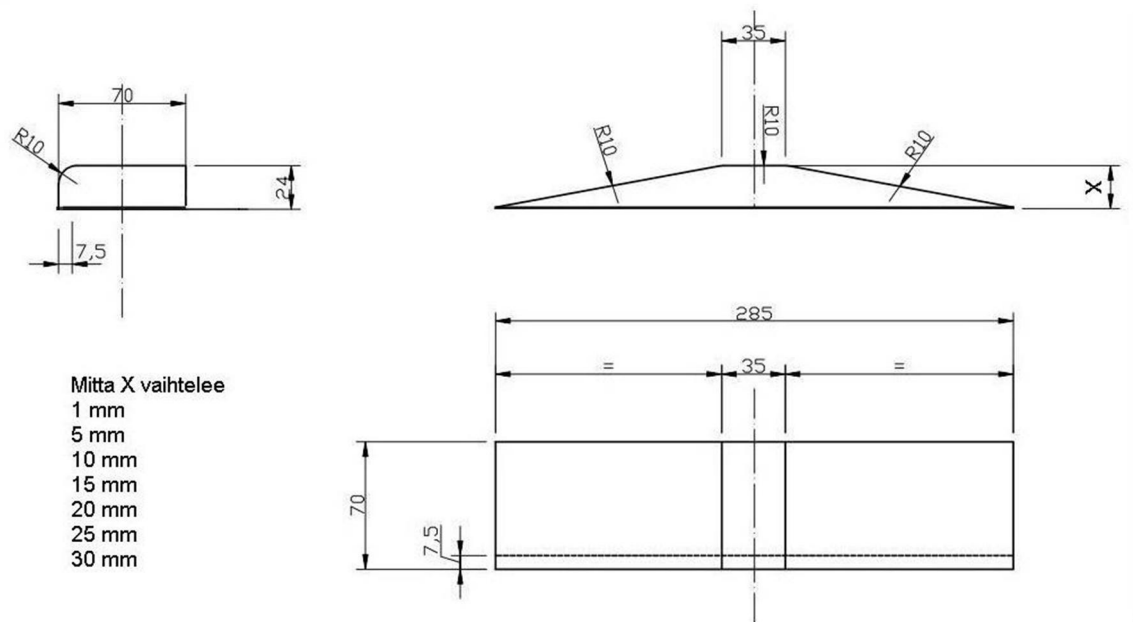
5.4.2 Herätteet

Herätteen geometrisena mallina suunniteltiin käytettäväksi telien jousituksen vapauttamiseen käytettyä tšekkiläistä kiskopomppua (kuva 5.19).



Kuva 5.19. Telien jousituksen vapauttamiseen käytetty kiskopomppu (Salmenperä & Nurmikolu 2012).

Kuvassa 5.19 esitetyn kiskopomppun korkeus kiskon yläpinnasta on 24 mm ja kulmamuu-
tuus on noin 11° . Kuvasta poiketen mittauksissa käytetyt pomput oli tarkoitus kiinnittää kiskon päälle, joten niitä ei olisi voitu kääntää välillä sivuun. Mittauksessa käytettävien herätteiden korkeus ja siten myös kulmamuu-
tuus olisivat vaihdelleet, ja suurimpien herätteiden suunniteltiin olevan hieman kuvan 5.19 kiskopomppua korkeampia. Suunniteltujen herätteiden geometriaa on kuvattu tarkemmin kuvassa 5.20.



Kuva 5.20. Mittauksissa käytettävien kiskopomppujen geometria.

Herätteiden aiheuttama iskuvoima on verrannollinen sekä junan nopeuteen että herätteen kulmamuuтокseen, joten iskuvoimaa olisi saatu säädeltyä herätteiden kulmamuuтокsen lisäksi helposti myös junan nopeudella.

6 TULOKSET

Tässä luvussa käydään läpi mittauksissa ja laskelmissa saatuja tuloksia. Tarkoituksena oli selvittää, miten erilaiset kiskon epäjatkuvuuskohdat vaikuttavat junan värähtelykäyttäytymiseen. Tavoitteena oli myös löytää yhteys junan värähtelyiden ja junaan kiinnittyneen lumen irtoamisen välille.

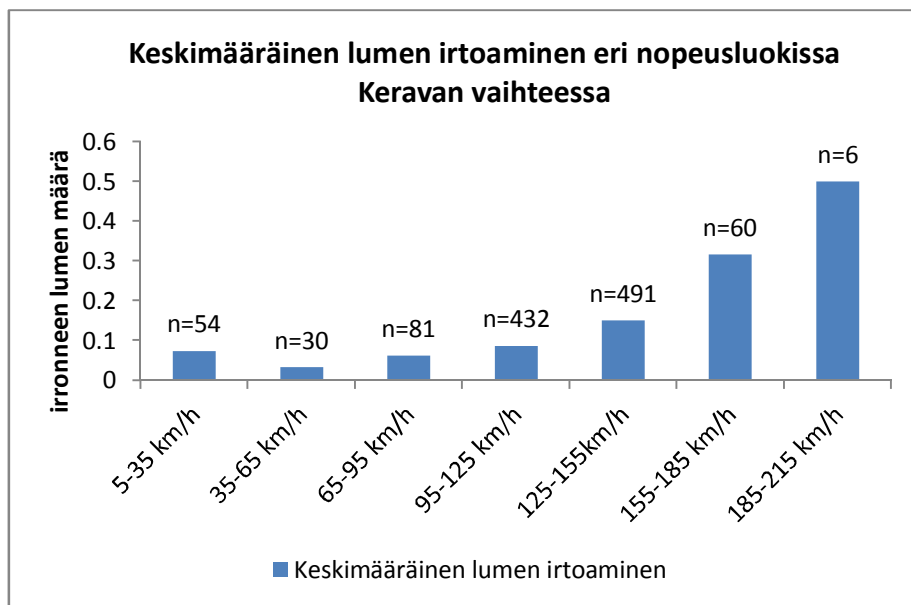
Mittaukset jakautuivat kahteen osaan, joista ensimmäisessä seurattiin lumen irtoamista junan alustasta vaihdealueella (luku 6.1). Mittauksissa selvitettiin sääolosuhteiden ja junan nopeuden vaikutusta junakalustoon kertyneen lumen irtoamiseen vaihdealueella. Toisessa osiossa tarkoituksena oli seurata junaan kertynyttä lunta sekä lumen irtoamista ja junaan kohdistuvia kiihtyvyyksiä kiskon epäjatkuvuuskohdissa (luku 6.2). Junan alustaan ei kuitenkaan kertynyt matkan aikana lunta juuri ollenkaan, joten toisessa osiossa päädyttiin seuraamaan lähinnä junaan kohdistuvia kiihtyvyyksiä. Kiihtyvyyksiä seurattiin sekä epäjatkuvuuskohdissa että tasaisilla suorilla rataosuuksilla. Laskentasuudessa on tarkasteltu kiskojohtoksen ja kiskopompun vaikutusta junan värähtelytasoon.

6.1 Seuranta vaihteissa

Tutkimuksessa seurattiin junaan kiinnittyneen lumen irtoamista kahdessa vaihteessa. Jokaisesta vaihteen ylittäneestä junasta kirjattiin ylös junan kulkuaika, suunta, nopeus, ulkoilman lämpötila, sääolosuhteet sekä junasta irronneen lumen määrä. Tarkoituksena oli selvittää, miten esimerkiksi junan nopeus ja sääolosuhteet vaikuttavat irronneen lumen määrään. Irronneen lumen määrää arvioitiin asteikolla 0–3 (luku 5.2).

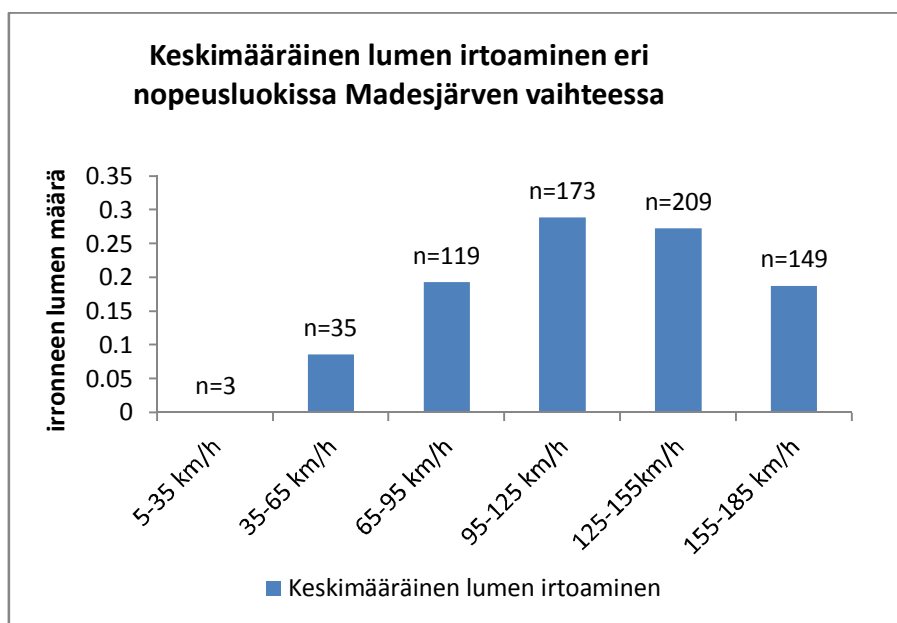
6.1.1 Junan nopeuden vaikutus lumen irtoamiseen

Ensimmäiseksi tarkasteltiin nopeuden vaikutusta lumen irtoamiseen. Junat on jaoteltu ajonopeutensa perusteella seitsemään nopeusluokkaan. Kuvassa 6.1 on esitetty keskimääräinen lumen irtoaminen yhtä junaa kohti eri nopeusluokissa Keravan vaihteessa. Kuvasta 6.1 huomataan, että suuremmilla nopeuksilla lunta on irronnut selvästi enemmän. Keravan vaihteessa voidaan havaita selvä yhteys lumen irtoamisen ja junan nopeuden välillä, ja junan nopeuden kasvaessa lunta irtoaa junista enemmän.



Kuva 6.1. Junaan kiinnittyneen lumen irtoaminen eri nopeusluokissa Keravan vaihteessa.

Tarkastellaan vielä vastaavaa kuvaajaa Madesjärven vaihteen osalta (kuva 6.2). Kuvaajassa ei ole mukana nopeusluokkaa 185–215 km/h, sillä kyseiseen nopeusluokkaan kuuluvia junia ei kulkenut Madesjärven vaihteesta lainkaan.

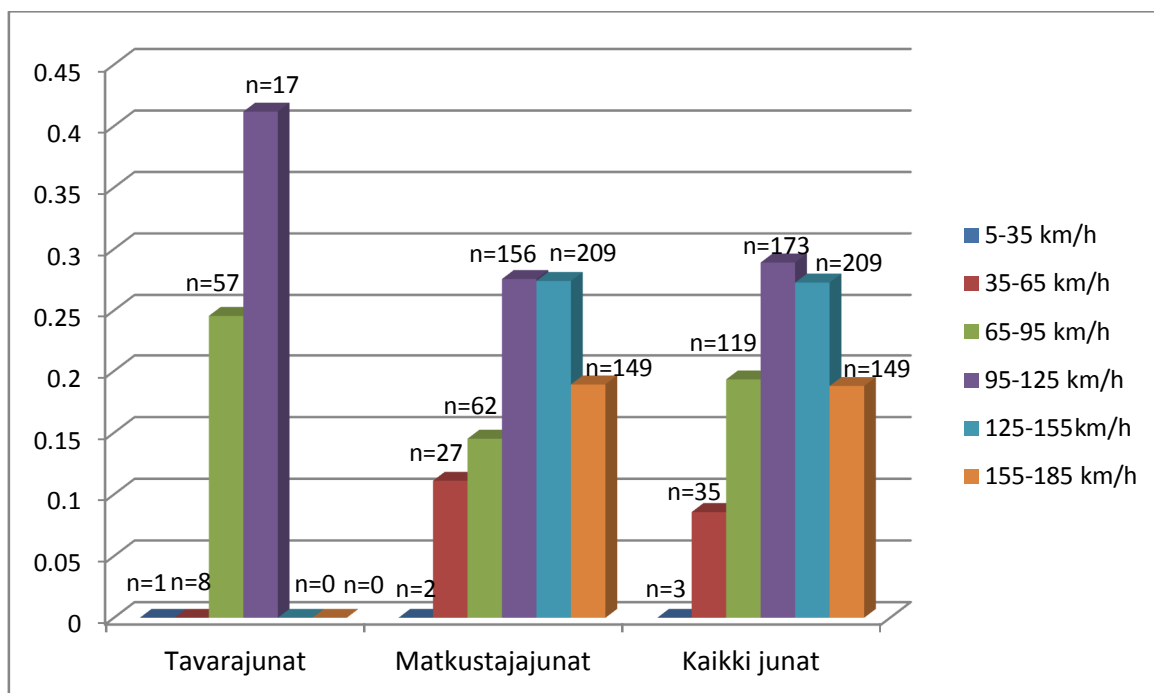


Kuva 6.2. Junaan kiinnittyneen lumen irtoaminen eri nopeusluokissa Madesjärven vaihteessa.

Madesjärven vaihteessa yhteys junan nopeuden ja lumen irtoamisen välillä ei ole yhtä selvä kuin Keravan vaihteessa. Alimmissa nopeusluokissa lunta irtoaa selvästi enemmän junan nopeuden kasvaessa, mutta ylimmissä nopeusluokissa ei tällaista yhteyttä enää ole. Erityisesti linjasta poikkeaa nopeusluokan 155–185 km/h junista irronneen

lumen keskimääräinen määrä, joka on selvästi pienempi kuin kahdessa alemmassa nopeusluokassa.

Keravan vaihteesta kulki vain muutama tavarajuna, joten lumen irtoamista eri nopeusluokissa ei voida tarkastella Keravan vaihteesta erikseen matkustaja- ja tavarajunille. Madesjärven vaihteesta sen sijaan kulki jo selvästi enemmän tavarajunia, joten tarkastelu tehtiin vielä erikseen Madesjärven vaihteesta kulkeneille tavara- ja matkustajajunille (kuva 6.3).



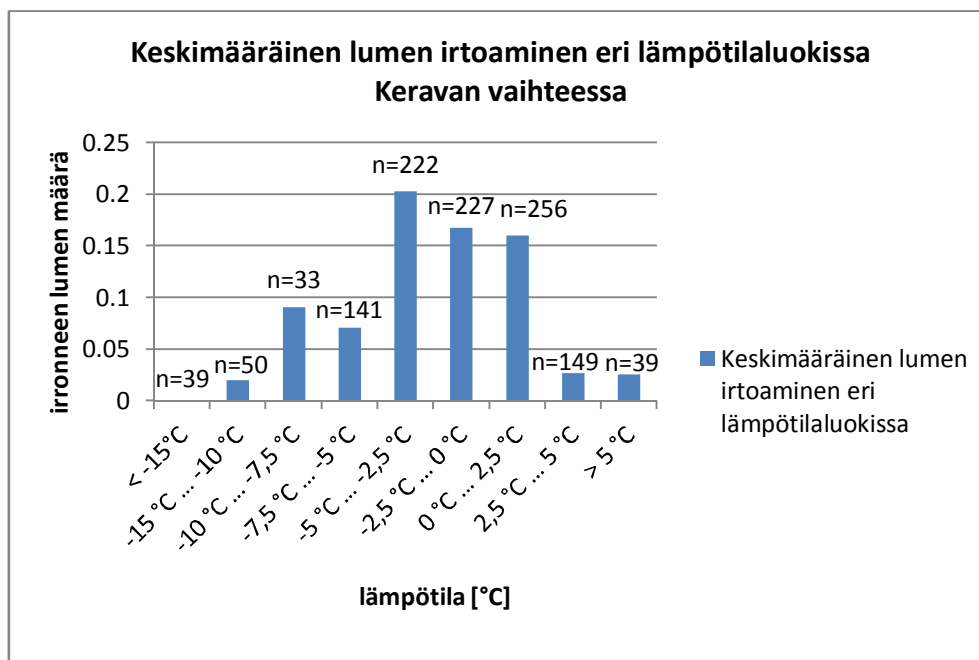
Kuva 6.3. Junaan kiinnittyneen lumen irtoaminen tavarajunille ja matkustajajunille eri nopeusluokissa Madesjärvellä.

Kuvasta 6.3 nähdään, että tavarajunilla lumen irtoaminen riippuu selvästi junan nopeudesta. Matkustajajunilla sen sijaan yhteys ei ole niin selkeä. Matkustajajunilla ylimpään nopeusluokkaan kuuluvista junista on irronnut selvästi vähemmän lunta kuin kahdessa alemmassa nopeusluokassa. Ylintä nopeusluokkaa lukuun ottamatta yhteys junan nopeuden ja irronneen lumen määrän suhteen on melko selkeä myös matkustajajunilla. Ylimmän nopeusluokan poikkeavaan tulokseen saattaa vaikuttaa esimerkiksi junan tyyppi. Tässä tarkastelussa on eroteltu ainoastaan tavarajunat matkustajajunista, joten eroa eri matkustajajunatyypin välillä ei pystytä arvioimaan.

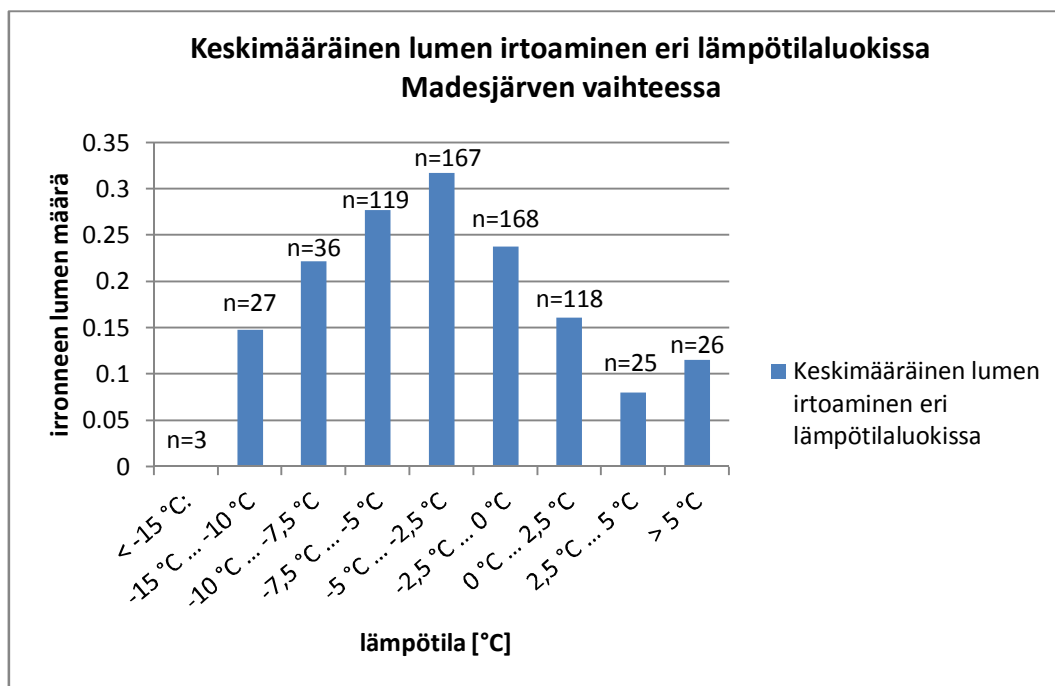
Vastaava tarkastelu tehtiin molempien vaihteiden tapauksessa vielä erikseen pelkästään sellaisille päiville, jolloin lunta on irronnut yli kulkevista junista selvästi keskimääräistä enemmän. Tässäkin tarkastelussa vain Keravan vaihteesta löytyi selvä yhteys junan nopeuden ja lumen irtoamisen välillä. Kuvaajat vastasivat melko tarkkaan aiemmin esitettyjä kuvia 6.1 ja 6.2.

6.1.2 Lämpötilan vaikutus lumen irtoamiseen

Seuraavaksi tarkasteltiin lämpötilan vaikutusta lumen irtoamiseen. Kuvissa 6.4 ja 6.5 on esitetty keskimääräinen lumen irtoaminen yhtä junaa kohti eri lämpötilaluokissa Keravan ja Madesjärven vaihteissa.



Kuva 6.4. Lumen irtoaminen eri lämpötilaluokissa Keravan vaihteessa.



Kuva 6.5. Lumen irtoaminen eri lämpötilaluokissa Madesjärven vaihteessa.

Kuvasta 6.4 nähdään, että Keravan vaihteessa junaan kertynyttä lunta on irronnut selvästi eniten lämpötilan ollessa välillä $-5\text{ °C} \dots +2,5\text{ °C}$. Lunta irttaa siis eniten lämpötilan ollessa nollan asteen tuntumassa tai hieman sen alapuolella. Kuvan 6.5 mukaan junaan kertynyttä lunta on irronnut Madesjärvellä eniten lämpötilan ollessa välillä $-7,5\text{ °C} \dots 0\text{ °C}$. Lunta on irronnut siis molemmissa tapauksissa eniten lämpötilan ollessa hieman nollan asteen alapuolella. Lumen kiinnittymisvoimat riippuvat hyvin paljon lämpötilasta, ja nollan asteen tuntumassa kiinnittymisvoimat ovat selvästi heikommät kuin kovalla pakkasella. Toisaalta lumen heikko kiinnittyminen voi tarkoittaa myös sitä, että junaan kertynyt lumi on irronnut junasta jo ennen tarkasteltavaa vaihdealuetta.

Vastaava tarkastelu tehtiin jälleen erikseen pelkästään sellaisille päiville, jolloin lunta on irronnut yli kulkevista junista selvästi keskimääräistä enemmän. Tällöin Keravalla lunta on irronnut eniten lämpötilan ollessa nollan asteen tuntumassa ja Madesjärvellä lämpötilan ollessa hieman nollan asteen alapuolella. Tulokset vastasivat suunnilleen kuvissa 6.4 ja 6.5 esitettyjä tuloksia.

6.1.3 Muut lumen irtoamiseen vaikuttavat asiat

Keravalla suurin osa junista kulki samaan suuntaan, mutta Madesjärvellä junia kulki myötä- ja vastavaihteeseen suunnilleen yhtä paljon. Madesjärvellä tarkasteltiin eroja lumen irtoamisessa myötä- ja vastavaihteeseen kulkemisen välillä, ja junan kulkusuunnalla ei havaittu olevan merkitystä irronneen lumen määrään. Tuloksista ei myöskään noussut esille mitään tiettyyn aikaan kulkevaa yksittäistä juna, josta lunta irtaaisi enemmän kuin muista junista. Kuvien perusteella pystyttiin erottamaan matkustaja- ja tavarajunat toisistaan, ja molemmista junatyypeistä irtosi lunta mittausten aikana keskimäärin suunnilleen saman verran. Matkustaja- ja tavarajunien keskinopeudet erosivat kuitenkin toisistaan selvästi, joten vastaava tarkastelu tehtiin vielä samassa nopeusluokassa oleville matkustaja- ja tavarajunille. Nopeusluokka valittiin siten, että molempien junatyypin keskinopeus kyseisessä nopeusluokassa oli suunnilleen sama. Kun tarkasteltiin matkustaja- ja tavarajunia erikseen nopeusluokassa 65–95 km/h, jolloin molempien junatyypin keskinopeus oli 77–79 km/h, tavarajunista irtosi enemmän lunta kuin matkustajajunista (kuva 6.3). Tavarajunia kulki kuitenkin valituista vaihteista kaiken kaikkiaan selvästi vähemmän kuin matkustajajunia. Mittaushavaintojen mukaan kaikista Madesjärven vaihteesta kulkeneista junista noin 11 % oli tavarajunia ja Keravan vaihteessa kulkeneista junista vain noin 0,3 %. Tämän vuoksi yksittäistapaukset vaikuttavat merkittävästi tavarajunista saatuihin tuloksiin. Junatyyppin vaikutusta lumen irtoamiseen olisi syytä tutkia tarkemmin siten, että mukana olisi enemmän tavarajunia. Myös erityyppisten matkustajajunien eroja lumen irtoamisen suhteen voitaisiin tutkia tarkemmin. Tässä tutkimuksessa saadusta kuvamateriaalista on pystytty erottamaan vain tavarajunat matkustajajunista.

Tuloksiin vaikutti siis selkeimmin ulkoilman lämpötila. Kun lämpötila oli nollan asteen tuntumassa tai hieman sen alapuolella, lunta irtosi vaihteen yli kulkevasta junasta sel-

västi useammin kuin muulloin. Luvussa 2 käsiteltiin lumen tai jään ja teräksen välillä vaikuttavia adheesiovoimia. Jo silloin todettiin, että lumen irtoaminen on hyvin lämpötilariippuvaista. Kovalla pakkasella adheesiovoimat ovat suuret ja lumen irtoaminen teräksen ja lumen liitoskohdasta epätodennäköistä. Lämpötila vaikuttaa myös lumen koheesiovoimiin, ja siksi lumen lujuusominaisuudet vahvistuvat lämpötilan laskiessa. Tämän vuoksi myös lumen irtoaminen murtumalla on kovalla pakkasella epätodennäköisempää. Mittauksista saadut tulokset tukevat tätä teoriaa.

Lisäksi lumen irtoamisella oli yhteys junan nopeuteen. Tämä voi johtua siitä, että junan nopeuden kasvaessa lumi irtoaa herkemmin. Toisaalta syynä voi olla myös se, että nopeammin kulkevat junat edustavat sellaista junatyyppeä, johon lunta kertyy enemmän ja siten irtoaa enemmän tai josta lunta irtoaa herkemmin. Myöhemmin tässä luvussa käy ilmi, että vaihteen epäjatkuvuuskohdan aiheuttama heräte on sitä suurempi, mitä nopeampaa vaihteesta kuljetaan. Tämän perusteella lumi irtoaisi mistä tahansa junatyypistä herkemmin nopeuden kasvaessa.

Yleisesti ottaen lunta kuitenkin irtosi kuvatuille vaihdealueille melko harvoin ja vain vähäisiä määriä. Siksi pienetkin yksittäiset erot irronneen lumen määrässä vaikuttavat tuloksiin merkittävästi.

6.2 Seuranta kalustossa

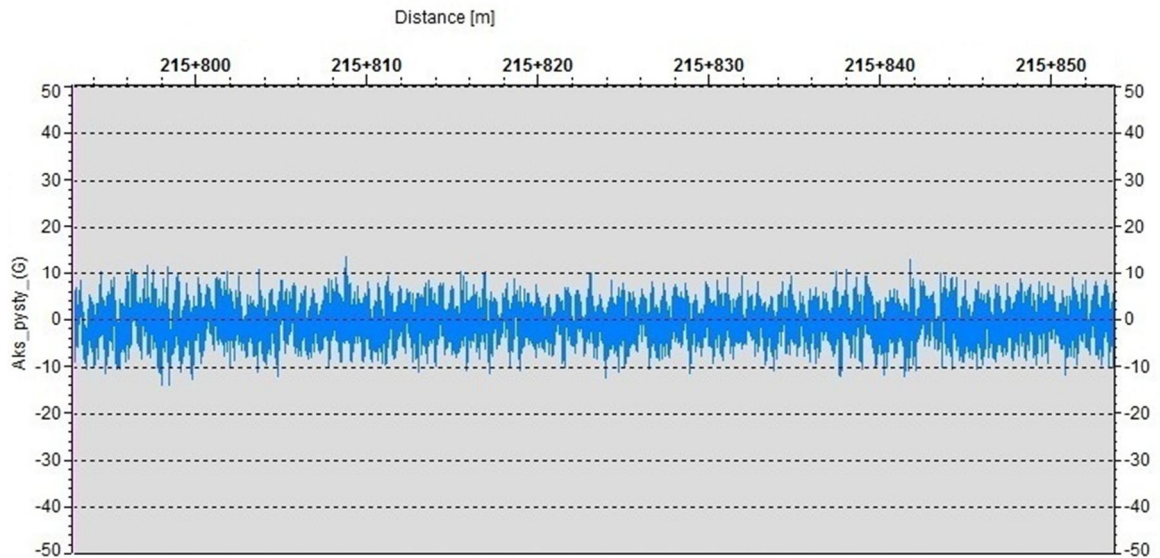
Junakaluston värähtelykäyttäytymistä tarkasteltiin sekä suoralla rataosuudella että erilaisissa epäjatkuvuuskohdissa, erityisesti vaihteissa. Kaikki kiihtyvyydet on ilmoitettu yksikössä g, joka vastaa SI-järjestelmän kiihtyvyyden arvoa $g=9,81 \text{ m/s}^2$. Mittausten aikana oli tarkoitus seurata myös junakalustoon kertyneen lumen irtoamista junan alustasta, jolloin olisi saatu selville yhteys lumen irtoamisen ja junakalustoon vaikuttavien kiihtyvyyksien välille. Junan alustaan ei kuitenkaan mittauspäivänä kertynyt lunta juuri ollenkaan, joten lumen irtoamisen ja junakalustoon vaikuttavien kiihtyvyyksien välistä yhteyttä ei tässä mittauksessa saatu selville.

6.2.1 Kiihtyvyydet suorilla linjaosuuksilla

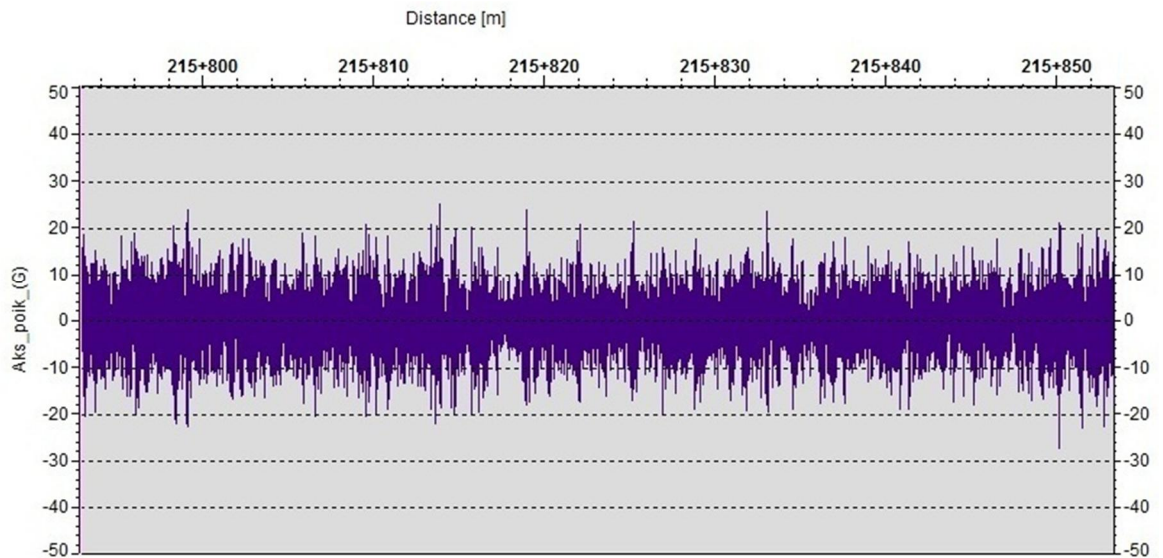
Kaluston kiihtyvyyksiä tarkasteltiin aluksi yleisesti matkalla Helsinki–Joensuu. Tarkastelun aikana on pyritty löytämään pyöräkerran, telin ja vaunun keskimääräinen värähtelykäyttäytyminen suoralla ja tasaisella rataosuudella ajettaessa (kuvat 6.6–6.13). Kuvissa on mukana kohinaa, jonka suuruus on arvioitu tarkastelemalla kiihtyvyydsdataa junan ollessa paikallaan. Kohinan on katsottu olevan niin pientä, että sillä ei ole vaikutusta kuvissa näkyvään kiihtyvyytasoon. Pyöräkerran akselista, telistä ja vaunusta on tarkasteltu pysty- ja vaakakiihtyvyyksiä. Näiden lisäksi telistä ja vaunusta on tarkasteltu myös radansuuntaista kiihtyvyyttä. Suoran linjaosuuden kiihtyvyyksiä on tarkasteltu sellaisilla osuuksilla, joilla junan nopeus on ollut noin 140 km/h. Kiihtyvyyden arvot on mitattu mittausvaunulle A17, jonka massa- ja jousitusominaisuudet poikkeavat hieman tyypillisestä matkustaja- ja tavaravaunusta. Tämän vuoksi mitatut arvot pätevät sellaisenaan

vain mittausvaunulle, mutta niiden avulla saadaan kuitenkin yleinen käsitys junien värähtelykäyttäytymisestä.

Kuvissa 6.6 ja 6.7 on tyypillisiä esimerkkejä pyöräkerran pysty- ja vaakakiihtyvyyksistä suoralla rataosuudella junan nopeuden ollessa 140 km/h. Pyöräkerran pystykiihtyvyyden värähtelytaso on noin 10 g ja vaakakiihtyvyyden noin 20 g. Värähtelytasolla tarkoitetaan tässä tarkastelussa sellaista värähtelyamplitudin arvoa, jonka alapuolelle suurin osa kiihtyvyyssarvoista sijoittuu.

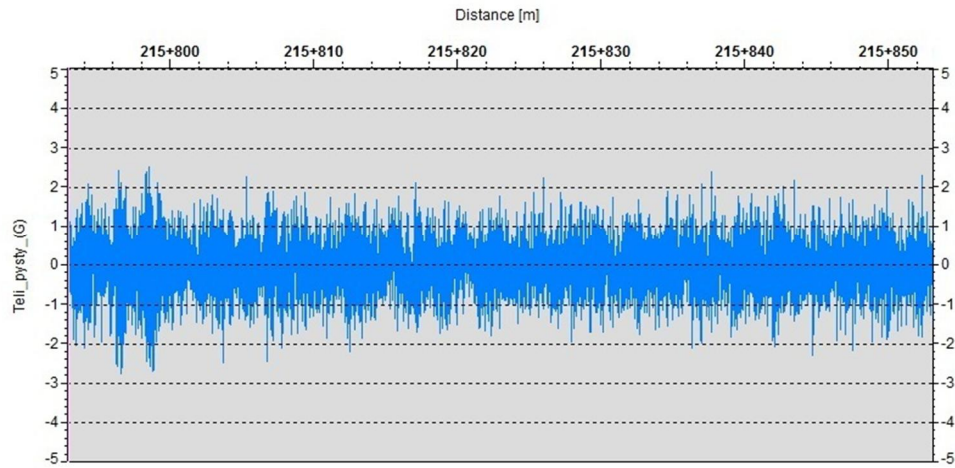


Kuva 6.6. Esimerkki pyöräkerran tyypillisestä pystykiihtyvyytkuvaajasta.

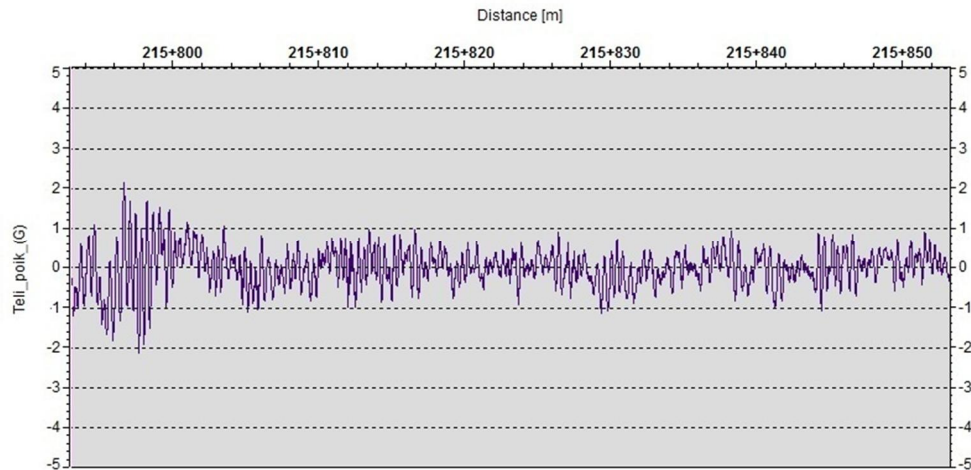


Kuva 6.7. Esimerkki pyöräkerran tyypillisestä vaakakiihtyvyytkuvaajasta.

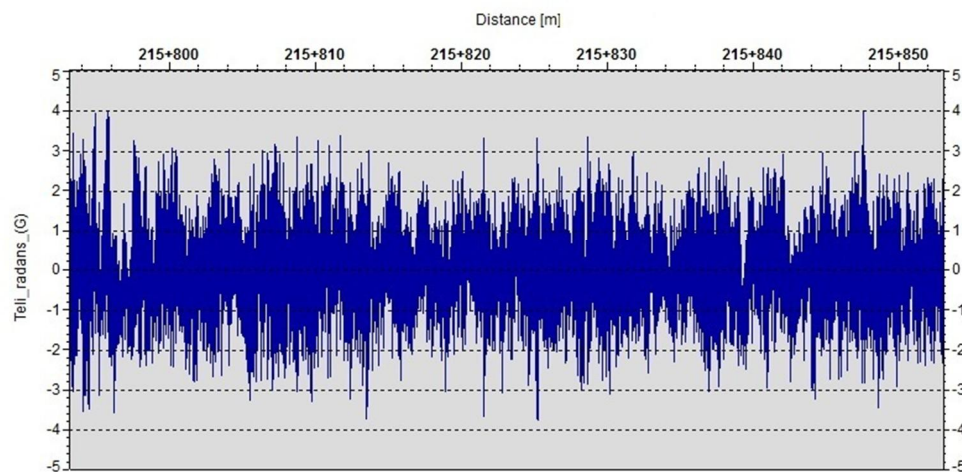
Kuvissa 6.8–6.10 on esimerkkejä telin tyypillisestä värähtelykäyttäytymisestä suoralla rataosuudella junan nopeuden ollessa 140 km/h. Telin pystykiihtyvyyden värähtelytaso on noin 2–3 g ja vaakakiihtyvyyden noin 1–2 g. Telistä mitattiin myös radansuuntaista kiihtyvyyttä, jonka värähtelytaso esimerkkitapauksessa on noin 3 g.



Kuva 6.8. Esimerkki telin tyypillisestä pystykiihtyvyysskuvaajasta.



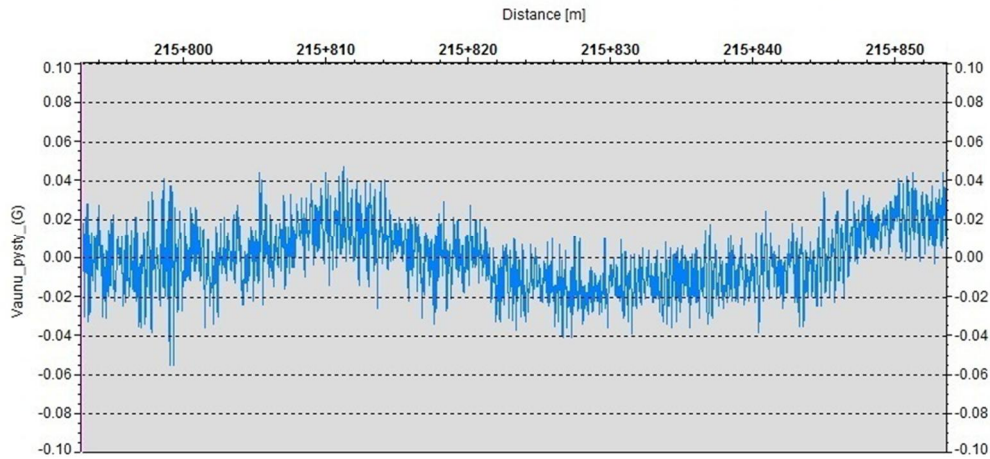
Kuva 6.9. Esimerkki telin tyypillisestä vaakakiihtyvyysskuvaajasta.



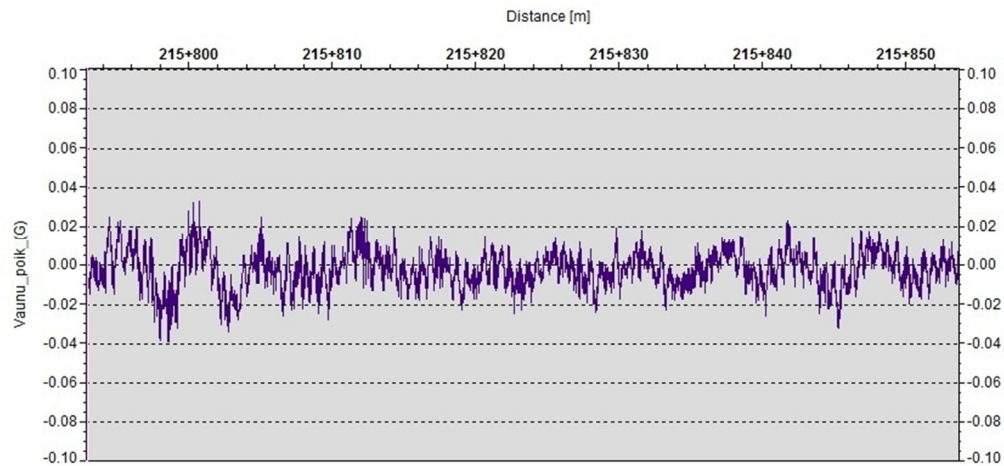
Kuva 6.10. Esimerkki telin tyypillisestä radansuuntaisesta kiihtyvyysskuvaajasta.

Kuvissa 6.11–6.13 on tyypillisiä esimerkkejä vaunun kiihtyvyyksistä suoralla rataosuudella junan nopeuden ollessa 140 km/h. Vaunun pystysuuntaisen kiihtyvyyden värähte-

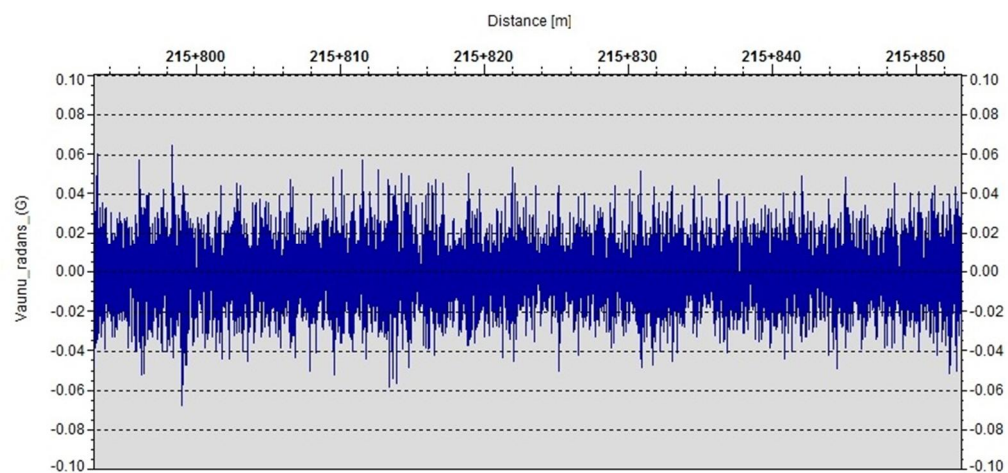
lytaso on noin 0,05 g ja vaakasuuntaisen kiihtyvyyden noin 0,02–0,03 g. Radansuuntaisen kiihtyvyyden värähtelytaso on esimerkkikuvassa noin 0,06 g.



Kuva 6.11. Esimerkki vaunun tyypillisestä pystysuuntaisesta kiihtyvyytkuvaajasta.



Kuva 6.12. Esimerkki vaunun tyypillisestä vaakakiihtyvyytkuvaajasta.



Kuva 6.13. Esimerkki vaunun tyypillisestä radansuuntaisesta kiihtyvyytkuvaajasta.

Värähtelytaso tasaisella rataosuudella on telissä noin 50-kertainen ja pyöräkerrassa noin 200–1000-kertainen verrattuna vaunun värähtelytasoon. Kuvaajista huomataan, että vaunun vaak- ja pystykiihtyvyysskuvaajat eroavat muodoltaan selvästi pyöräkerran ja telin vaak- ja pystykiihtyvyysskuvaajista. Kuvissa 6.11 ja 6.12 värähtely on aaltomaista ja kiihtyvyyden muutokset ovat melko pieniä kiihtyvyyden arvoon nähden. Kuvaajia tarkastellessa voidaan myös huomata, että vaunun pysty- ja vaakasuuntaisessa kiihtyvyysskuvaajassa sekä telin vaakakiihtyvyysskuvaajassa kiihtyvyyden muutokset eivät ole yhtä nopeita kuin muissa kuvaajissa. Vaunussa oleva matkustaja ei koe epämiellyttävänä niinkään junavaunun suurta kiihtyvyyttä kuin junavaunun suurta kiihtyvyyden muutosnopeutta. Siksi vaunussa kiihtyvyyden muutosnopeuden eli nykäyksen (*jerk*) olisi hyvä olla mahdollisimman pieni.

Seuraavissa taulukoissa 6.1–6.5 on lueteltu eri rataosuuksien keskimääräinen värähtelytaso pyöräkerrassa, telissä ja vaunussa. Taulukoiden keskimääräisellä värähtelytasolla tarkoitetaan suoran ja jatkuvan rataosuuden keskimääräisiä kiihtyvyyshuippuja. Osuuksilla on myös näistä arvoista poikkeavia suurempia arvoja, mutta suurin osa suoran rataosuuden arvoista sijoittuu taulukoissa mainittujen arvojen alapuolelle. Keskimääräinen värähtelytaso on arvioitu eri rataosuuksilla aina sellaisista kohdista, joissa junan nopeus on ollut 140 km/h.

Taulukko 6.1. Keskimääräinen värähtelytaso suoralla linjaosuudella Tikkurila–Lahti-välillä.

	pyöräkerta (g)	teli (g)	vaunu (g)
pystykiihtyvyys	10–12	2-3	0,05
vaakakiihtyvyys	20	1-2	0,02–0,03
radansuunt. kiihtyvyys	-	2-3	0,04–0,06

Taulukko 6.2. Keskimääräinen värähtelytaso suoralla linjaosuudella Lahti–Kouvola-välillä.

	pyöräkerta (g)	teli (g)	vaunu (g)
pystykiihtyvyys	10–15	3	0,05
vaakakiihtyvyys	20	1-1,5	0,02–0,03
radansuunt. kiihtyvyys	-	4	0,06

Taulukko 6.3. Keskimääräinen värähtelytaso suoralla linjaosuudella Kouvola–Lappeenranta-välillä.

	pyöräkerta (g)	teli (g)	vaunu (g)
pystykiihtyvyys	10	2-3	0,05
vaakakiihtyvyys	20	1-1,5	0,02–0,03
radansuunt. kiihtyvyys	-	3-3,5	0,05–0,06

Taulukko 6.4. Keskimääräinen värähtelytaso suoralla linjaosuudella Lappeenranta–Parikkala-välillä.

	pyöräkerta (g)	teli (g)	vaunu (g)
pystykiiihtyvyys	10	2–3	0,05–0,07
vaakakihtyvyys	20–30	2	0,05
radansuunt. kiihtyvyys	-	2–3	0,05–0,06

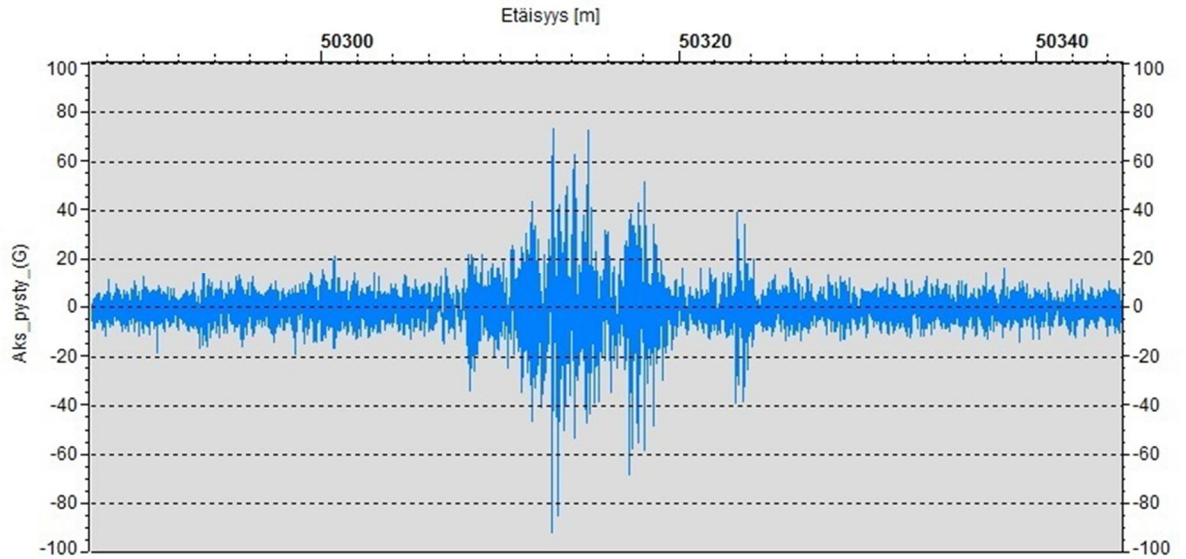
Taulukko 6.5. Keskimääräinen värähtelytaso suoralla linjaosuudella Parikkala–Joensuu-välillä.

	pyöräkerta (g)	teli (g)	vaunu (g)
pystykihtyvyys	15	3–4	0,10
vaakakihtyvyys	25	3–4	0,05
radansuunt. kiihtyvyys	-	4	0,07

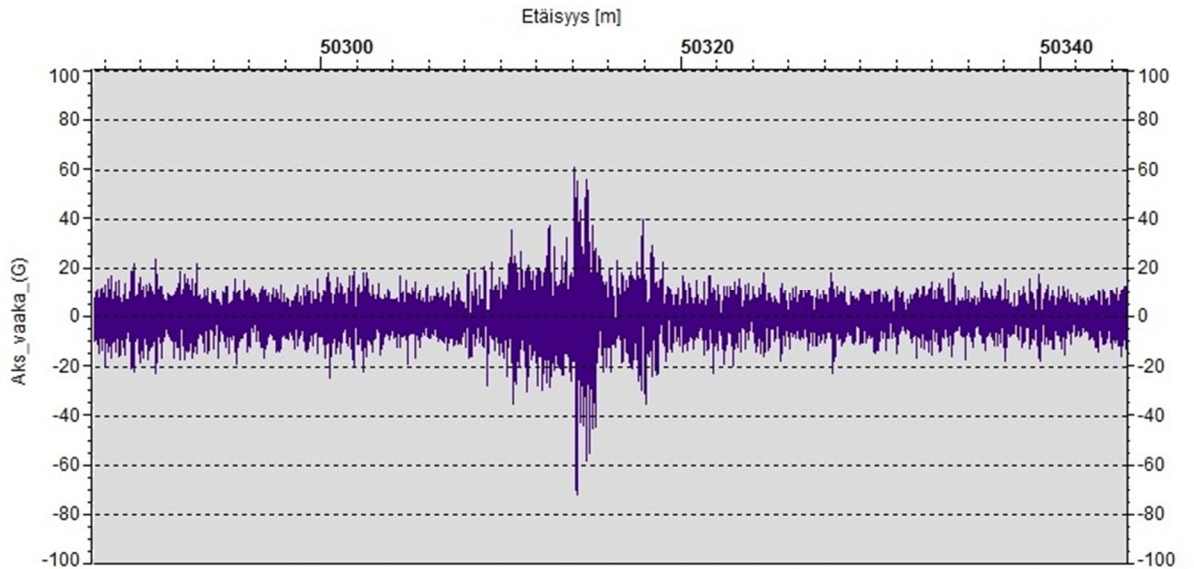
Helsinki–Lappeenranta-välillä kaikkien rataosuuksien keskimääräiset kiihtyvyydet ovat samaa luokkaa. Lappeenranta–Joensuu-välillä keskimääräiset kiihtyvyydet kasvavat Joensuuta kohti kuljettaessa, ja Parikkala–Joensuu-välillä kiihtyvyydet ovat suurempia kuin Lappeenranta–Parikkala-välillä. Nämä ovat kuitenkin vain silmämääräisiä arvioita eri rataosuuksille, ja eri rataosuuksien kunnollinen vertailu vaatisi tarkempaa värähtely-analyysia.

6.2.2 Vaihteiden aiheuttama tyypillinen värähtely junakalustossa

Seuraavaksi värähtelyiden analysoinnissa on keskitytty tarkastelemaan vaihteiden aiheuttamia värähtelyitä. Vaihteiden värähtelyiden analysoinnissa on kirjattu ylös aina vaihteen aiheuttama suurin värähtelyamplitudi. Vaihteiden tarkastelussa ei ole huomioitu esimerkiksi värähtelyn kestoa tai taajuussisältöä. Vaihteiden aiheuttamien värähtelyiden osalta on tarkasteltu kahta eri vaihdetyyppiä, pitkää vaihdetta YV60-900-1:18 ja lyhyttä vaihdetta YV60-300-1:9. Molempien vaihdetyyppien tapauksessa on tarkasteltu erityisesti junan pyöräkerran pysty- ja vaakakihtyvyyksiä, ja esimerkkikuvissa on esitelty tyypilliset tapaukset pitkän ja lyhyen vaihteen aiheuttamista kiihtyvyyksistä pyöräkerrassa. Kaikki tulokset on saatu vaihteista suoraan ajettaessa. Kuvissa 6.14 ja 6.15 on tyypilliset esimerkit junan pyöräkerran pysty- ja vaakakihtyvyyden värähtelytasosta pitkässä vaihteessa junan kulkiessa nopeudella 140 km/h myötävaihteeseen. Maksimikihtyvyydet saavutetaan sekä pysty- että vaakakihtyvyyden osalta samassa kohdassa, ja pystysuunnassa maksimikihtyvyys on suurempi. Vaihde aiheuttaa selvän poikkeaman värähtelytasoon sekä vaaka- että pystykihtyvyyden tapauksessa.

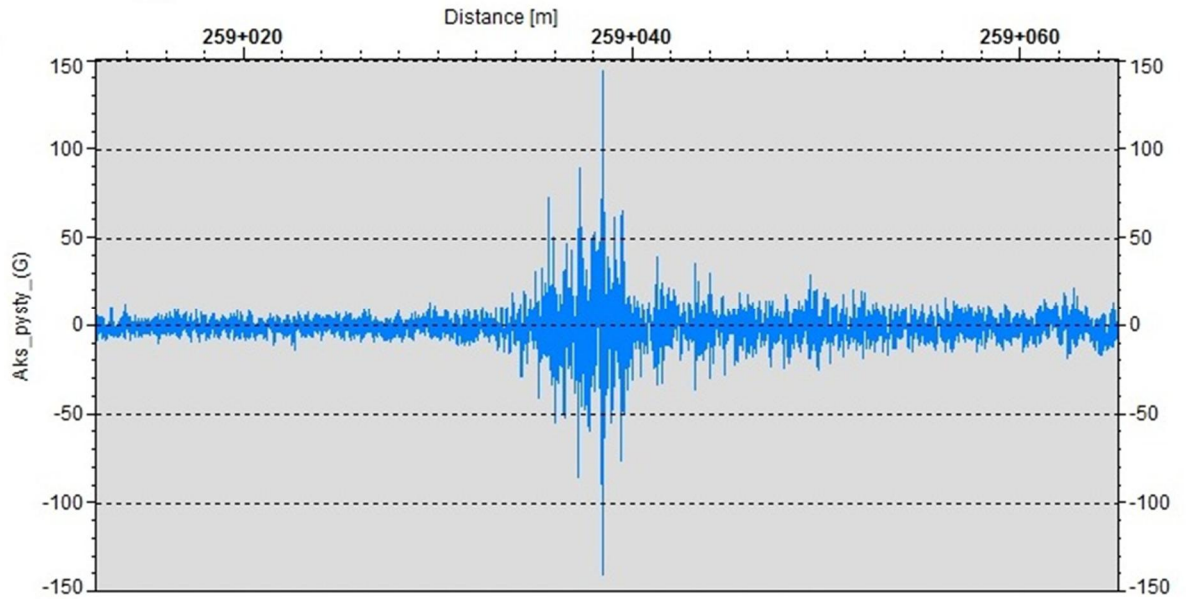


Kuva 6.14. Esimerkki pyöräkerran pystykiihtyvyydestä pitkässä vaihteessa.

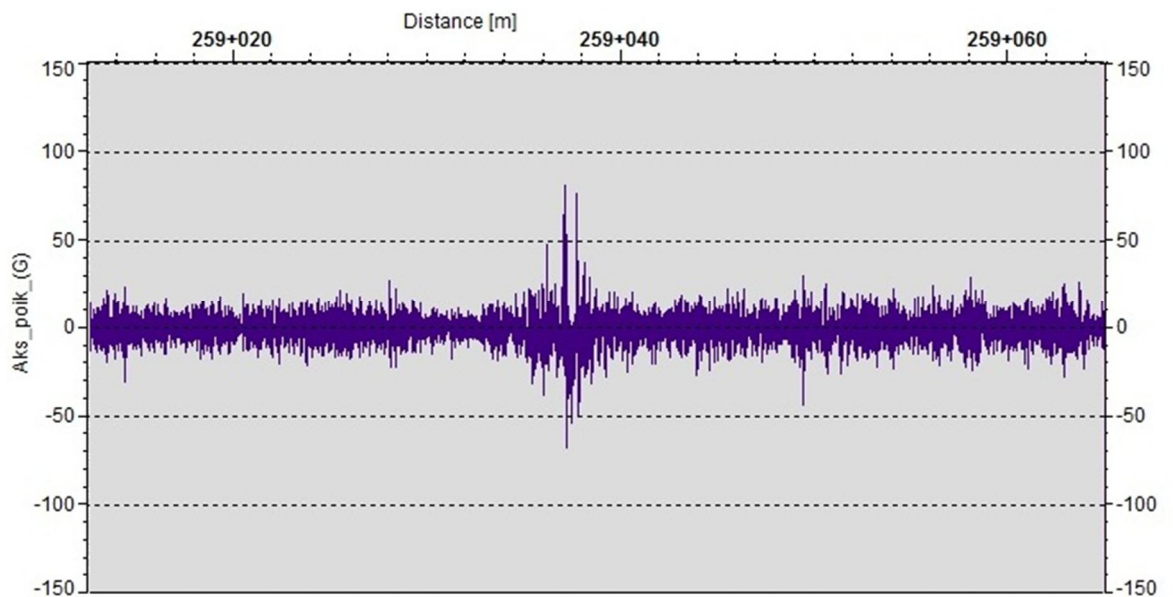


Kuva 6.15. Esimerkki pyöräkerran vaakakiihtyvyydestä pitkässä vaihteessa.

Kuvissa 6.16 ja 6.17 on tyypilliset esimerkit junan pyöräkerran pysty- ja vaakakiihtyvyydestä lyhyessä vaihteessa junan nopeuden ollessa 140 km/h. Tässäkin tapauksessa juna on kulkenut myötävaihteeseen. Maksimikiihtyvyydet saavutetaan jälleen suunnilleen samassa kohdassa, ja pystykiihtyvyyden maksimiarvo on suurempi.



Kuva 6.16. Esimerkki pyöräkerran pystykihtyvyydestä lyhyessä vaihteessa.

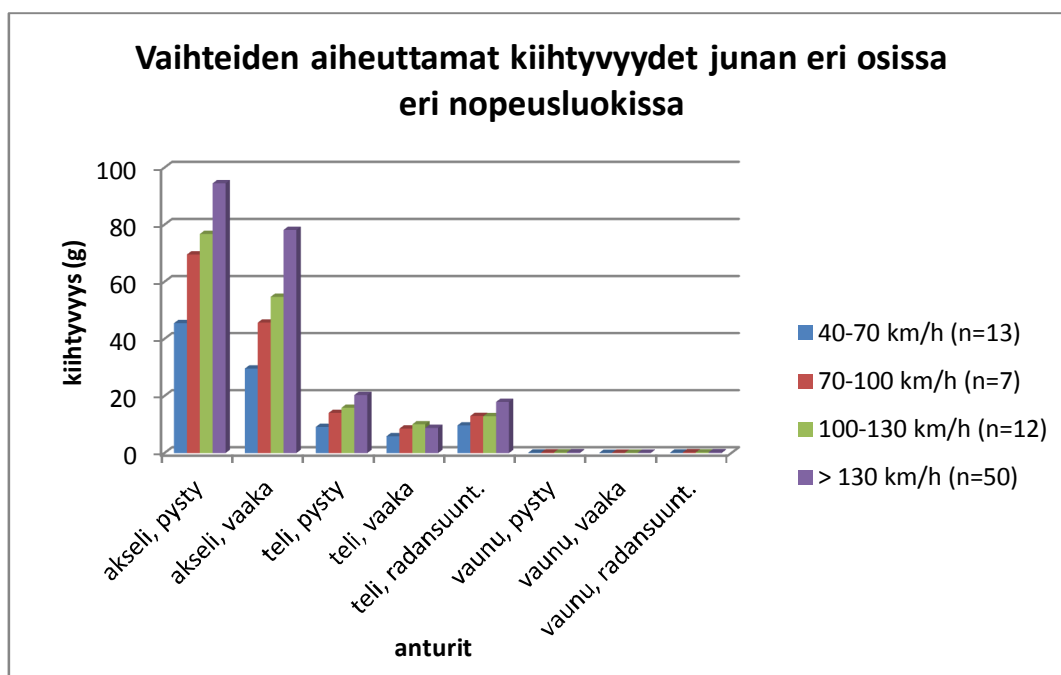


Kuva 6.17. Esimerkki pyöräkerran vaakakihtyvyydestä lyhyessä vaihteessa.

Myös lyhyen vaihteen tapauksessa vaihde aiheuttaa selvän poikkeaman normaaliin värähtelytasoon sekä pysty- että vaakasuuntaisessa kiihtyvyysskuvaajassa.

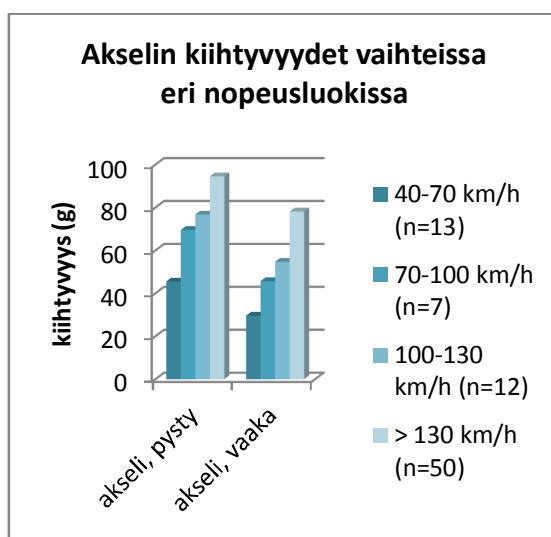
6.2.3 Junan nopeuden vaikutus vaihteiden aiheuttamaan värähtelyyn

Kulkunopeudet kaikissa tarkastelluissa vaihteissa on jaoteltu neljään eri nopeusluokkaan, joiden avulla nähdään nopeuden vaikutus värähtelyyn. Kuvassa 6.18 on tarkasteltu keskimääräistä vaihteen aiheuttamaa maksimivärähtelyä eri nopeusluokissa.

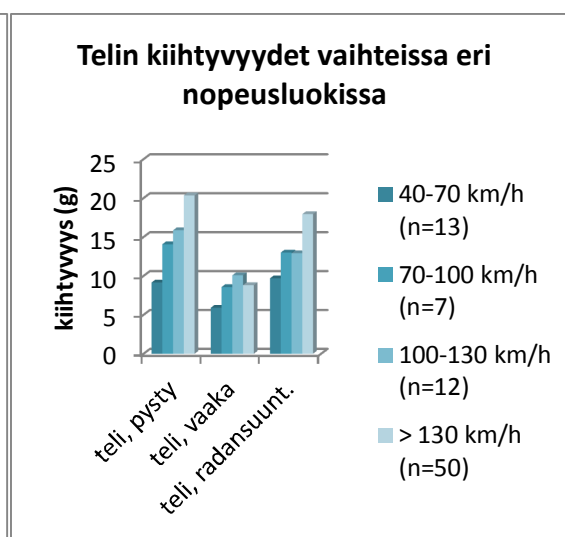


Kuva 6.18. Vaihteiden aiheuttamat kiihtyvyydet eri nopeusluokissa.

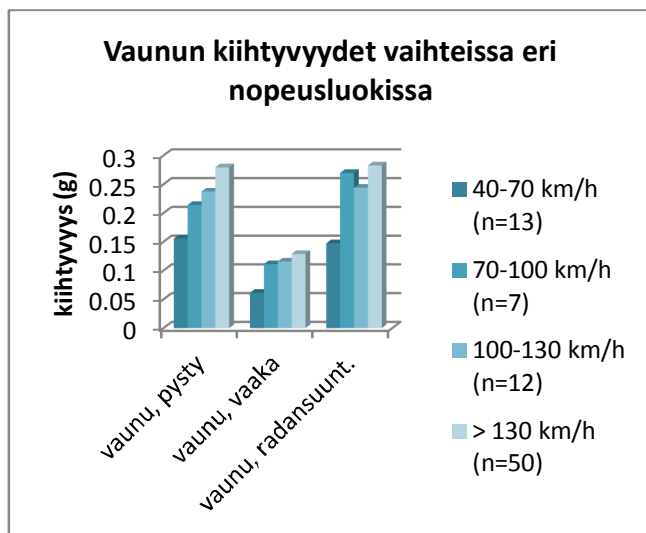
Kuvissa 6.19–6.21 on esitetty tarkemmin vaihteen aiheuttamat keskimääräiset maksimikiihtyvyydet eri nopeusluokissa pyöräkerrassa, telissä ja vaunussa. Kuvista 6.18–6.21 voidaan huomata, että junan nopeudella on selvä vaikutus keskimääräiseen maksimivärähtelyyn kaikissa tarkastelupisteissä. Lähes jokaisessa mittauspisteessä kiihtyvyyden keskimääräinen maksimiampplitudi kasvaa siirryttäessä suurempaan nopeusluokkaan. Kun junan nopeus kasvaa, vaihteen epäjatkuvuuskohta aiheuttaa siis junaan suuremmat kiihtyvyydet.



Kuva 6.19. Kiihtyvyydet pyöräkerrassa.



Kuva 6.20. Kiihtyvyydet telissä.



Kuva 6.21. Kiihtyvyydet vaunussa.

Taulukossa 6.6 on esitetty kuvien 6.18–6.21 kiihtyvyyssarvot. Taulukon arvot on ilmoitettu yksikössä g, sillä sitä on käytetty kiihtyvyyden yksikkönä mittauksissa.

Taulukko 6.6. Vaihteiden aiheuttamat keskimääräiset maksimikiihtyvyyssamplitudit eri nopeusluokissa.

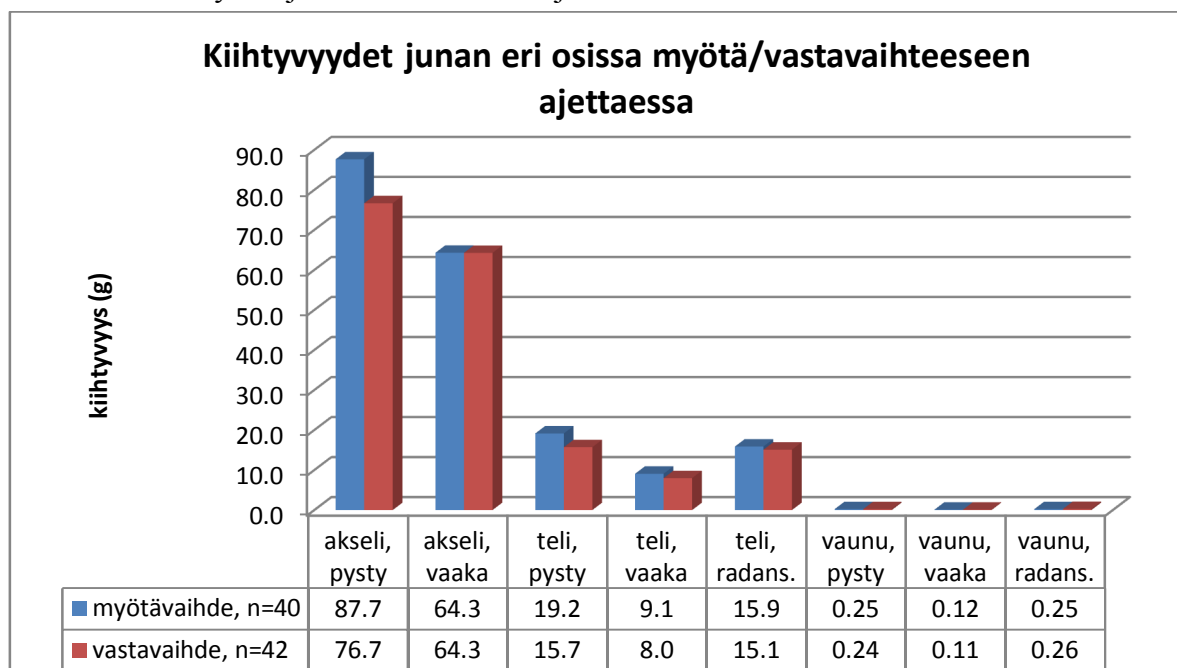
Kiihtyvyyden maksimiampplitudit	40–70 km/h	70–100 km/h	100–130 km/h	yli 130 km/h
Akseli, pystykiihtyvyys (g)	45,5	69,6	76,8	94,5
Akseli, vaakakiihtyvyys (g)	29,6	45,7	54,8	78,2
Teli, pystykiihtyvyys (g)	9,2	14,1	15,9	20,4
Teli, vaakakiihtyvyys (g)	5,9	8,6	10,1	8,8
Teli, radansuunt. kiihtyvyys (g)	9,7	13,0	12,9	17,9
Vaunu, pystykiihtyvyys (g)	0,16	0,21	0,24	0,28
Vaunu, vaakakiihtyvyys (g)	0,06	0,11	0,12	0,13
Vaunu, radansuunt. kiihtyvyys (g)	0,15	0,27	0,24	0,28

Näissä tarkasteluissa ovat olleet mukana kaksi eri vaihdetyyppiä, YV60-900-1:18 ja YV60-300-1:9, joista on useimmiten ajettu yli vähintään nopeudella 130 km/h. Lyhyessä vaihteessa keskinopeus on ollut 101 km/h (mediaani 134 km/h) ja pitkässä vaihteessa 123 km/h (mediaani 135 km/h). Kahta eri vaihdetyyppiä tarkasteltiin myös erikseen,

jolloin molemmille löytyi vastaava yhteys junan nopeuden ja värähtelytason välillä. Tällä lisätarkastelulla varmistettiin, että junan nopeudella todella on yhteys junan värähtelyihin. Yhteys nopeuden ja värähtelytason välillä on niin selvä, että sen voidaan olettaa pätevän mittausvaunun lisäksi myös muilla vaunutyypeillä.

6.2.4 Junakaluston värähtely myötä- ja vastavaihteeseen ajettaessa

Seuraavaksi on tarkasteltu, miten myötä- ja vastavaihteeseen ajo vaikuttaa värähtelyyn. Vaihteet jaoteltiin myötä- ja vastavaihteisiin, jonka jälkeen junan kiihtyvyyksiä tarkasteltiin kummassakin tapauksessa erikseen. Kuvassa 6.22 on esitetty kiihtyvyydet junan eri osissa myötä- ja vastavaihteeseen ajettaessa.



Kuva 6.22. Kiihtyvyydet junan eri osissa myötä- ja vastavaihteeseen ajettaessa.

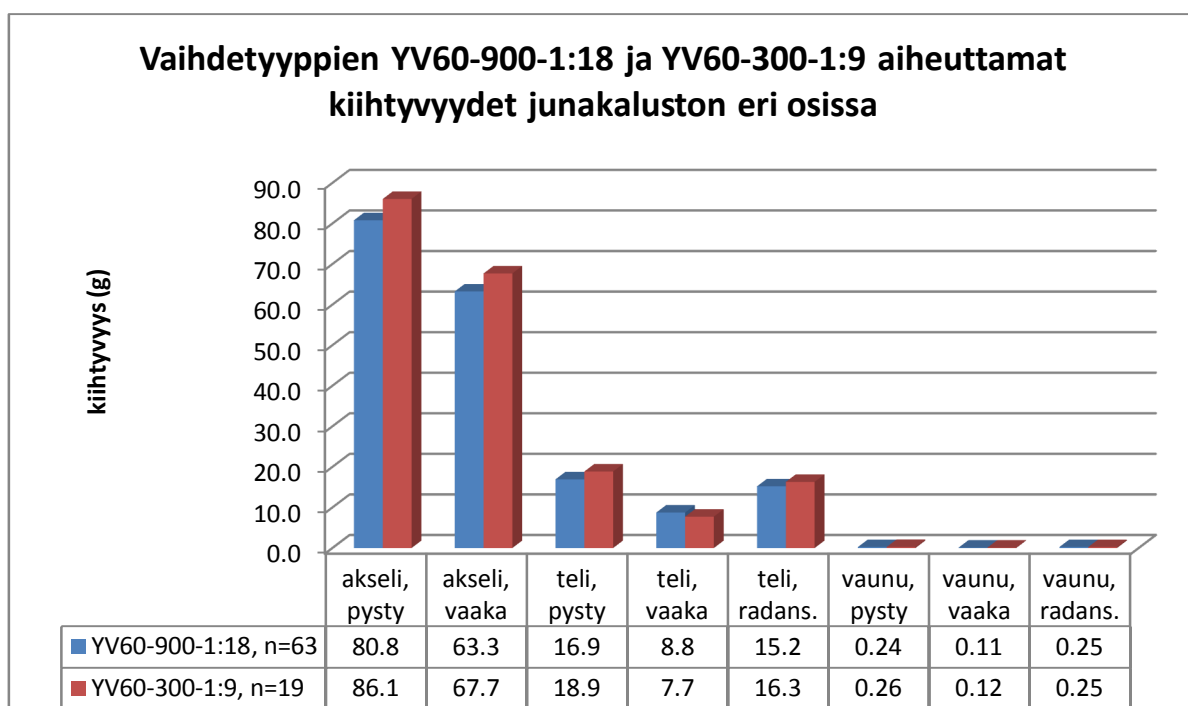
Myötävaihteeseen ajettaessa keskimääräiset maksimikiihtyvyydet ovat kuvan 6.22 mukaan yleensä korkeammat kuin vastavaihteeseen ajettaessa, mutta ero ei ole kovin suuri. Lisäksi myötävaihteeseen kuljettaessa junan keskinopeus on ollut tarkasteltavien vaihteiden kohdalla 120,25 km/h kun vastavaihteeseen kuljettaessa keskinopeus on ollut 115,5 km/h. Todennäköisesti kiihtyvyyssamplitudierot johtuvat siis lähinnä junien nopeuseroista eivätkä niinkään eroavaisuuksista myötä- tai vastavaihteeseen ajon suhteen. Myötä- ja vastavaihteen eroja oli syytä tarkastella tietyllä nopeusvälillä tarkemman arvion saamiseksi. Tarkastelu tehtiin vielä nopeusvälillä 130–145 km/h, jolloin sekä myötä- että vastavaihteeseen ajettaessa keskimääräinen nopeus on ollut 138 km/h. Tällöin keskimääräiset maksimikiihtyvyyssarvot olivat myötä- ja vastavaihteen tapauksissa suunnilleen samat. Myötä- ja vastavaihteen välillä ei siis ole selvää eroa kiihtyvyyden maksimiampplitudin suhteen, mutta eroa voi silti olla esimerkiksi värähtelyn taajuuksien tai värähtelyn keston suhteen. Tässä tarkastelussa vertailu on suoritettu ainoastaan värähtelyn maksimiampplitudin suhteen.

6.2.5 Muut vaihteiden aiheuttamaan värähtelyyn vaikuttavat asiat

Kiihtyvyydatasta arvioitiin myös vaihteen puolisuuden vaikutusta vaihteen aiheuttamiin värähtelyihin. Vaihteen puolisuudella tarkoitetaan sitä, poikkeako vaihde vastavaihteeseen katsottuna vasemmalle vai oikealle. Tällä tarkastelulla haluttiin lähinnä selvittää, vaikuttaako kiihtyvyyssantureiden sijainti mittausvaunun vasemmalla puolella joihenkin tuloksiin. Vaihteen puolisuudella ei havaittu olevan merkitystä vaihteen aiheuttamaan maksimivärähtelyamplitudiin.

Jokaisessa tarkastellussa vaihteessa kirjattiin ylös myös vaihteen asennusvuosi. Asennusvuodet vaihtelivat välillä 1990–2011. Vaihteet jaoteltiin asennusvuoden perusteella neljään eri vuosiluokkaan, jonka jälkeen tarkasteltiin vaihteen aiheuttamia kiihtyvyyksiä eri luokissa. Vaihteen asennusvuoden merkitystä vaihteen aiheuttamiin värähtelyihin ei tämän selvityksen perusteella pystytäkään kertomaan, sillä junan ajonopeus eri vuosiluokkien vaihteissa vaihteli huomattavasti. Vanhemmissa vaihteissa junan keskinopeus (64 km/h) on ollut merkittävästi pienempi kuin uudemmissa vaihteissa (138 km/h). Tämän vuoksi kiihtyvyyksien keskimääräisiin arvoihin eri asennusvuosiluokissa vaikuttavat selvästi junan nopeudet eikä tuloksista pysty tämän tarkastelun perusteella erottamaan vaihteen asennusvuoden merkitystä arvoihin.

Viimeiseksi eri vaihdetyyppejä YV60-900-1:18 ja YV60-300-1:9 verrattiin keskenään. Vaihteet jaoteltiin vaihdetyypin mukaan, ja kiihtyvyyksiä tarkasteltiin kummassakin vaihdetyypissä erikseen. Kuvassa 6.23 on esitetty vaihdetyyppien aiheuttamat kiihtyvyydet junan eri osissa.



Kuva 6.23. Vaihdetyyppien aiheuttamat kiihtyvyydet junan eri osissa.

Lyhyt vaihde YV60-300-1:9 aiheuttaa keskimäärin hieman suuremmat maksimikiihtyvyydet junakalustoon kuin pitkä vaihde YV60-900-1:18. Lyhyeen vaihteeseen kuljettaessa keskinopeus on ollut 101,2 km/h, kun pitkässä vaihteessa keskinopeus on ollut 122,8 km/h. Aiemmin on jo selvinnyt, että suurempi nopeus aiheuttaa suuremmat kiihtyvyyssarvot. Tästä huolimatta lyhyessä vaihteessa maksimikiihtyvyydet ovat olleet suurempia, jolloin erojen voidaan päätellä johtuvan nimenomaan vaihdetyypeistä. Mikäli keskinopeudet olisivat molemmissa samoja, olisi maksimikiihtyvyyksien välinen ero todennäköisesti vielä selvempi. Vaihdetyyppi YV60-300-1:9 aiheuttaa siis tämän tutkimuksen perusteella hieman suuremmat kiihtyvyydet liikkuvaan kalustoon kuin vaihdetyyppi YV60-900-1:18.

Vaihteissa kumpaankin suuntaan kuljettaessa suurimmat kiihtyvyyssamplitudit vaikuttivat aiheuttavan risteyksen kärjen kohdalla sijaitseva raiteen epäjatkuvuuskohta (H kuvassa 4.9). Vaihteen aiheuttamat kiihtyvyydetasot junan eri osissa olivat noin 4–10-kertaiset verrattuna suoran jatkuvan rataosuuden aiheuttamiin kiihtyvyyksiin.

6.2.6 Muiden epäjatkuvuuskohtien aiheuttama värähtely junakalustossa

Vaihteiden lisäksi kiihtyvyydatasta tarkasteltiin hieman myös muiden epäjatkuvuuskohtien aiheuttamaa värähtelytasoa. Tasoristeysten aiheuttama värähtelytaso oli usein vastaava kuin vaihteissa, tasoristeyksestä riippuen 1–10-kertainen suoran rataosuuden värähtelytasoon nähden. Muutamissa tapauksissa tasoristeysten aiheuttama värähtely ei juuri poikennut suoran rataosuuden värähtelytasosta.

Siltojen aiheuttama värähtelytaso vaihteli myös melko paljon. Joskus siltojen kohdalla junan värähtely ei juuri poikennut suoran rataosuuden värähtelytasosta, toisinaan värähtely oli jopa samalla tasolla kuin vaihteissa. Reitillä oli erityyppisiä ja erikokoisia siltoja, ja siksi myös siltojen aiheuttamat värähtelytasot vaihtelivat selvästi. Yleisesti ottaen siltojen kohdalla värähtely oli 1–4-kertainen suoran rataosuuden värähtelytasoon verrattuna.

Kisko jatko kohtia ei tässä tarkastelussa pystytty erottamaan suoran rataosuuden värähtelykäyttäytymisestä, ja kisko jatko kohtien tarkastelu vaatisikin tarkempaa kiihtyvyyssadan analysointia sekä tietoa jatko kohtien sijainnista.

6.3 Laskentatulokset

Junan käyttäytymistä tarkasteltiin myös laskentaohjelman avulla. Vampire Pro -dynamiikkaohjelmalla on selvitetty luvussa 4 esiteltujen matkustaja- ja tavaravaunun värähtelykäyttäytymistä. Vaunuille laskettiin ominaisvärähtelytaajuuudet ja -muodot. Lisäksi ohjelmalla tarkasteltiin erilaisten kiskon epäjatkuvuuskohtien vaikutusta vaunuihin. Näiden epäjatkuvuuskohtien aiheuttamia värähtelyitä on tarkoitettu vertailla mittaamalla saatuihin vaihteiden aiheuttamiin värähtelyihin. Vaihteiden värähtelyanalyysissä keskityttiin maksimikiihtyvyyssamplitudiin, joten myös kisko jatkoksen ja kiskopompin värähtelyissä on tarkasteltu maksimikiihtyvyyssamplitudeja. Dynamiikkaohjelmalla saadut

kiihtyvyytulokset on ilmoitettu aina kuvaajissa yksikössä m/s^2 . Taulukoissa kiihtyvyydet on ilmoitettu sekä yksikössä g että yksikössä m/s^2 .

Pyörän ja kiskon kontaktin laskennassa on käytetty pyöräprofiilina S 1002 -profiilia ja kiskoprofiilina UIC60-20 -profiilia.

6.3.1 Oinaismuodot

Matkustaja- ja tavaravaunulle tehtiin ominaismuotoanalyysi, jonka avulla saatiin selville vaunutyyppien ominaisvärähtelytaajuudet ja niitä vastaavat ominaisvärähtelymuodot. Matkustajavaunun kaksitoista alinta ominaistajuutta sekä niitä vastaavien vaunun ominaismuotojen nimitykset on esitetty taulukossa 6.7.

Taulukko 6.7. Matkustajavaunun alimmat ominaistajuudet ja vastaavien ominaismuotojen nimitykset.

i	i:s ominaistajuus f (Hz)	ominaismuoto
1	0	-
2	0	-
3	0,196	-
4	0,375	lower center roll
5	0,669	bounce
6	0,709	yaw
7	0,805	pitch
8	1,048	upper center roll
9	3,658	-
10	4,036	-
11	4,037	-
12	4,398	-

Taulukossa 6.7 esitettyjen ominaistajuuksien lisäksi mallin vaunulla on vielä 20 korkeampaa ominaistajuutta, sillä mallissa on käytetty 32 vapausastetta. Alimmat ominaistajuudet ovat kuitenkin yleensä laskennan kannalta olennaisempia, ja siksi tässä vaiheessa on keskitytty tarkastelemaan alimpia ominaisvärähtelymuotoja. Useille ominaismuodoille löytyi vastaavuus kuvassa 4.3 esitetyistä vaunun ominaismuodoista, ja nämä on nimetty taulukossa 6.7. Loput ominaismuodot, joita ei ole erikseen nimetty, liittyvät telin tai pyöräkertojen liikkeisiin.

Matkustajavaunun ominaismuodot yksinkertaisemmalle värähtelymallille laskettiin aiemmin luvussa 4. Tuloksista erottui parhaiten bounce-värähtelymuoto, jonka ominaistajuudeksi saatiin $f = 1,27 \text{ Hz}$. Tässä tarkemmassa mallissa bounce-värähtelymuodon ominaistajuudeksi saatiin $f = 0,67 \text{ Hz}$. Tulokset eivät täysin vastaa toisiaan, mikä to-

dennäköisesti johtuu laskentamallien eroavaisuuksista. Dynamiikkaohjelmassa käytettyssä mallissa oli enemmän vapausasteita, ja siksi kyseisellä mallilla saadut tulokset ovat tarkempia.

Vastaava ominaismuotoanalyysi tehtiin myös tavaravaunulle. Tavaravaunun kaksitoista alinta ominaistajuutta sekä niitä vastaavien vaunun ominaismuotojen nimitykset on esitetty taulukossa 6.8.

Taulukko 6.8. *Tavaravaunun alimmat ominaistajuudet ja niitä vastaavat ominaismuodot.*

i	i:s ominaistajuus f (Hz)	ominaismuoto
1	0,001	-
2	0,001	-
3	0,001	-
4	0,001	-
5	0,157	-
6	0,688	lower center roll
7	1,346	yaw
8	1,414	bounce
9	1,513	upper center roll
10	1,671	pitch
11	13,573	-
12	13,573	-

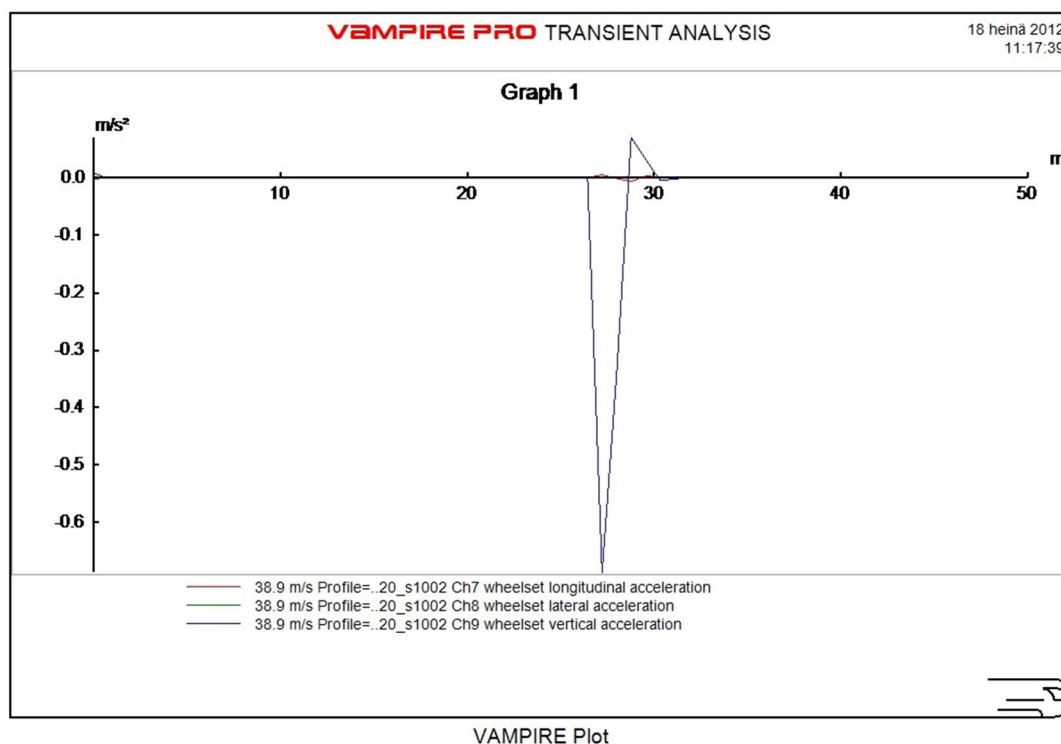
Tavaravaunun mallissa on käytetty 22 vapausastetta, joten taulukossa esitettyjen lisäksi korkeampia ominaistajuuksia on vielä kymmenen. Taulukkoon on nimetty vaunun ominaismuotojen nimitykset kuvan 4.3 mukaisesti. Loput ominaismuodot liittyvät pyöräkertojen liikkeeseen tai pyöräkertojen ja vaunun yhdistettyyn liikkeeseen.

Kummastakin mallista löytyivät siis kaikki kuvassa 4.3 esitetyt vaunun ominaisvärähtelymuodot. Ominaistajuus, jolla tietty ominaismuoto esiintyy, riippuu kuitenkin värähtelymallista. Matkustajavaunun mallissa ominaismuodot esiintyvät eri ominaistajuuksilla kuin tavaravaunussa. Matkustajavaunussa eri ominaismuotoja vastaavat ominaistajuudet ovat alhaisempia kuin tavaravaunun mallissa.

6.3.2 Kiskojatkos

Kiskojatkoskohtaa on mallinnettu dynamiikkaohjelmassa 21 mm pituisella ja 10 mm syvällä lovella. Jatkoskohta on sijoitettu radalla viiden metrin kohdalla molemmille kiskoille. Kiskojatkoskohdan yli on ajettu ensin matkustajavaunulla, jonka esimerkkinä laskuissa toimii yksikerroksinen IC-vaunu eli Ex-vaunu. Kuvassa 6.24 nähdään kisko-

jatkoskohdan aiheuttamat kiihtyvyydet radansuunnassa sekä vaaka- ja pystysuunnassa matkustajavaunun pyöräkerrassa. Nopeutena on käytetty 38,9 m/s eli 140 km/h. Kuvan vaaka-akselilla oleva matka kuvaa ensimmäisen pyöräkerran etäisyyttä lähtöpisteestä. Kisko jatkos on sijoitettu radalla viiden metrin kohdalle molemmilla kiskoilla. Anturit on sijoitettu taaimpaan pyöräkertaan, eli anturoitu pyöräkerta kulkee kiskopompun yli noin 26,6 metrin kohdalla.



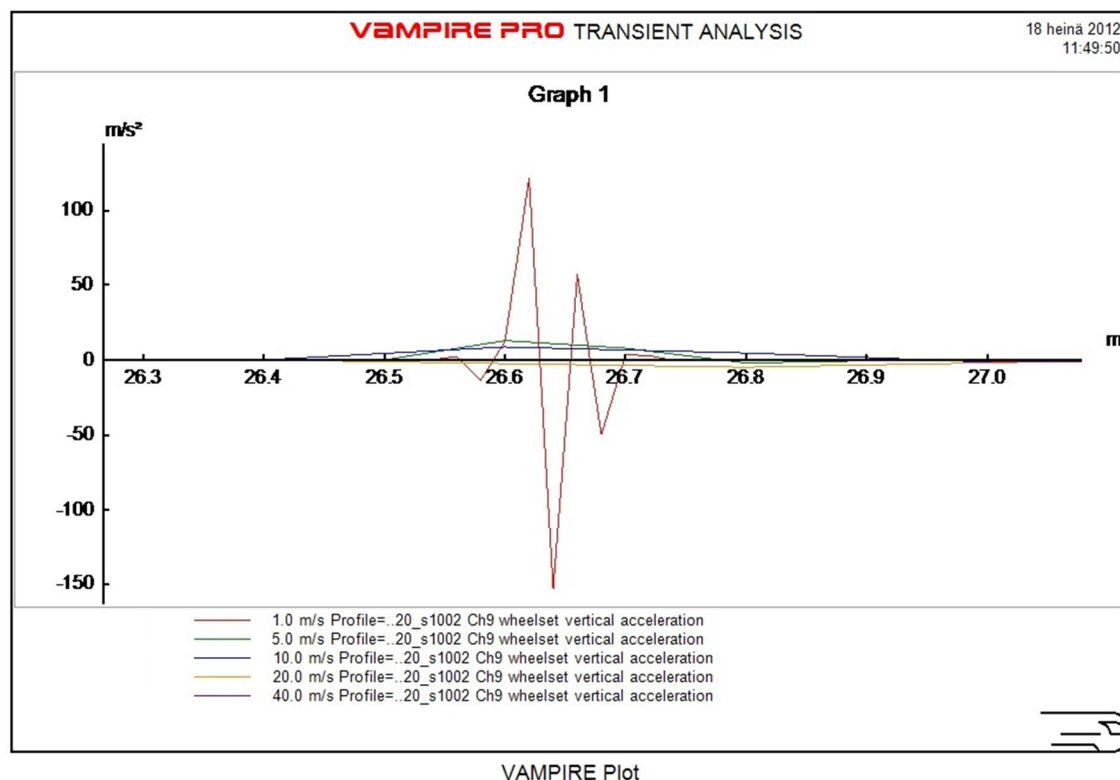
Kuva 6.24. Kisko jatkoskohdan aiheuttamat kiihtyvyydet matkustajavaunun pyöräkerrassa nopeudella 140 km/h.

Kuvasta 6.24 huomataan heti, että pyöräkerran pystykiihtyvyys on selvästi suurempi kuin poikittaiskiihtyvyys tai radansuuntainen kiihtyvyys. Pyöräkerran suurin pystykiihtyvyys on $0,69 \text{ m/s}^2$ eli noin $0,07 \text{ g}$. Telissä suurin kiihtyvyys on pystysuunnassa $0,013 \text{ m/s}^2$ eli noin $0,001 \text{ g}$. Vaunussa maksimikiihtyvyyden arvo on radan suunnassa $0,50\text{e-}3 \text{ m/s}^2$ eli noin $5,05\text{e-}5 \text{ g}$.

Seuraavaksi tarkasteltiin nopeutta 20 m/s eli 72 km/h. Pyöräkerran suurimmaksi kiihtyvyyssamplitudiksi pystysuunnassa saatiin tällöin $4,85 \text{ m/s}^2$ eli noin $0,49 \text{ g}$. Telin suurin kiihtyvyys oli pystysuunnassa $0,187 \text{ m/s}^2$ eli noin $0,019 \text{ g}$. Vaunun suurimmaksi kiihtyvyydeksi saatiin pystysuunnassa $0,97\text{e-}3 \text{ m/s}^2$ eli noin $9,9\text{e-}5 \text{ g}$.

Kiihtyvyyksien arvot olivat hyvin pieniä, ja useimmiten pystysuuntaisen kiihtyvyyden arvo oli selvästi suurempi kuin poikittaiskiihtyvyyden tai radansuuntaisen kiihtyvyyden. Tästä eteenpäin tarkastelu rajattiinkin ainoastaan pyöräkerran, telin ja vaunun pystykiihtyvyyksiin. Lisäksi ajonopeuden laskiessa kiihtyvyyden arvot nousivat, joten oli syytä tarkastella kiihtyvyyksien arvoja myös pienemmillä nopeuksilla. Seuraavaksi

tarkasteltiin pyöräkerran pystykiihtyvyyksiä eri ajonopeuksilla (kuva 6.25). Ajonopeuksina on käytetty 1 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 20 m/s ja 40 m/s.

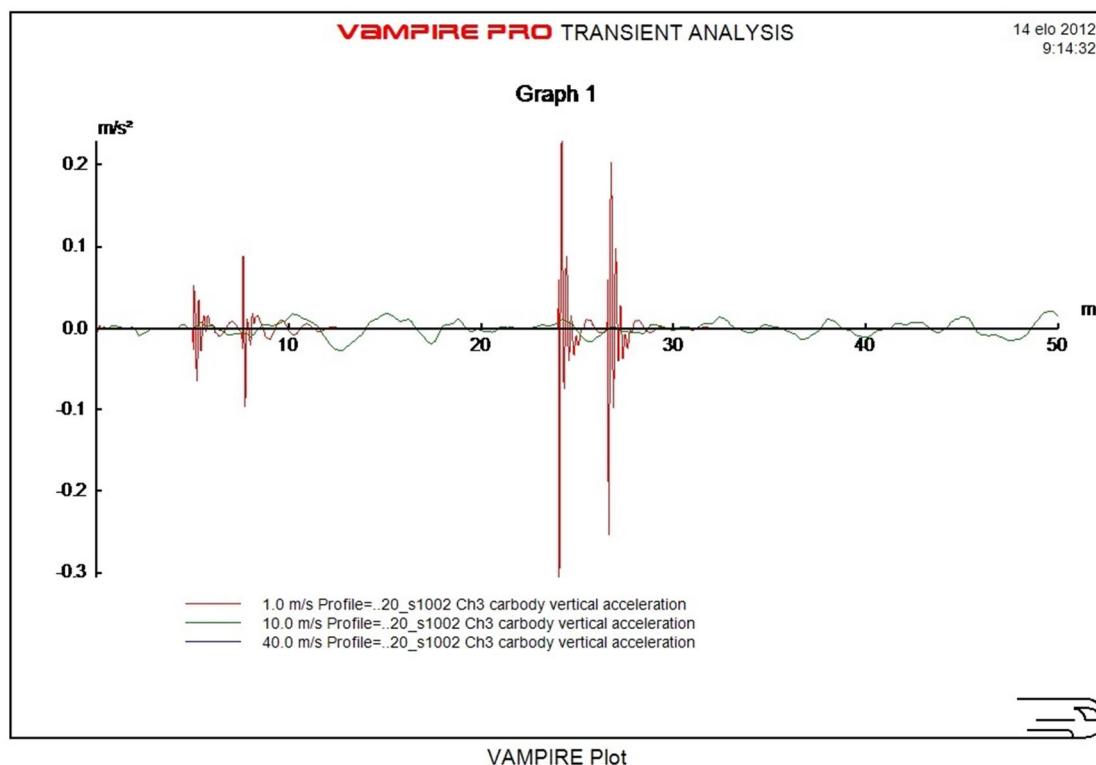


Kuva 6.25. Matkustajavaunun pyöräkerran pystykiihtyvyydet kiskoatkoskohdassa nopeuksilla 1 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 20 m/s ja 40 m/s.

Kuvasta 6.25 huomataan, että pienemmillä nopeuksilla kiihtyvyyssamplitudi on selvästi suurempi. Värähtelykäyttäytyminen ei siis tässä tapauksessa vastaa aiemmin esitettyjä epäjatkuvuuskohdan iskuvoiman kaavoja 4.25 ja 4.26, joiden mukaan iskuvoima on suoraan verrannollinen junan nopeuteen. Toisaalta pienemmillä nopeuksilla värähtely vaimenee nopeammin. Värähtely alkaa poiketa normaalitasosta, kun anturoitu pyöräkerta ylittää kiskoatkoskohdan, eli noin 26,6 m kohdalla. Suurin pystykiihtyvyyssamplitudi on nopeudella 1 m/s saatu $151,2 \text{ m/s}^2$ eli noin 15,4 g. Tämä arvo on hyvin pieni verrattuna vaihteissa mitattuihin arvoihin eikä poikkea juuri lainkaan tasaisella suoralla radalla mitatuista pyöräkerran pystykiihtyvyyssarvoista. Tarkastellaan kuitenkin vielä vaunurungon pystykiihtyvyyksiä eri ajonopeuksilla.

Kuvassa 6.26 on esitetty matkustajavaunun pystykiihtyvyydet kiskoatkoskohdissa nopeuksilla 1 m/s, 10 m/s ja 40 m/s. Osa aiemmin käytetyistä nopeuksista on jätetty kuvasta pois, jotta kuvaaja olisi selkeämmin luettavissa. Vaunun kiihtyvyysskuvaajassa arvot alkavat poiketa normaalitasosta jo ensimmäisen pyöräkerran ylittäessä kiskoatkoksen, eli suunnilleen viiden metrin kohdalla. Punaisesta käyrästä ($v = 1 \text{ m/s}$) havaitaan hyvin jokaisen neljän pyöräkerran kiskoatkoskohdan ylitys. Nopeudella 10 m/s värähtelyamplitudit ovat jo selvästi pienempiä kuin nopeudella 1 m/s, mutta värähtely kestää pidempään. Nopeudella 40 m/s värähtelyamplitudit ovat jo niin pieniä, että niitä ei erota

kuvasta. Tässäkin tapauksessa vaunun kiihtyvyyssamplitudit siis pienenevät selvästi ajonopeuden kasvaessa ja pienimmällä testatulla ajonopeudella värähtely vaimenee nopeammin kuin muilla.



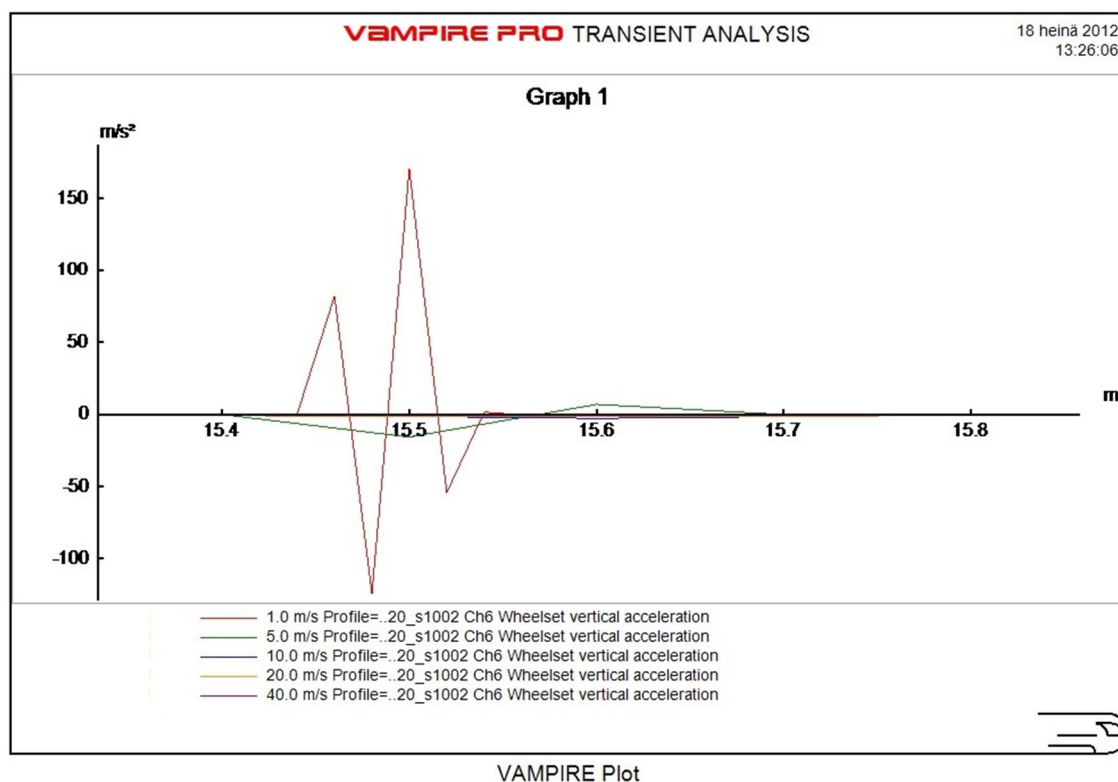
Kuva 6.26. Matkustajavaunun vaunurungon pystykiihtyvyydet kiskoatkoskohdassa nopeuksilla 1 m/s, 10 m/s ja 40 m/s.

Kiihtyvyyssamplitudien arvot on kerrottu tarkemmin taulukossa 6.9, josta löytyvät pyöräkerran ja vaunun arvojen lisäksi myös telin maksimi-arvot. Arvoista nähdään selvästi, että matkustajavaunun ylittäessä kiskoatkoksen vaunun eri osiin kohdistuvat kiihtyvyydet pienenevät nopeuden kasvaessa.

Taulukko 6.9. Matkustajavaunun pyöräkerran, telin ja vaunun pystykiihtyvyyden maksimi-arvot kiskoatkoksen kohdalla.

Nopeus (m/s)	Pystykiihtyvyyden maksimi-arvo pyöräkerrassa		Pystykiihtyvyyden maksimi-arvo telissä		Pystykiihtyvyyden maksimi-arvo vaunussa	
	(m/s^2)	(g)	(m/s^2)	(g)	(m/s^2)	(g)
1	153,2	15,6	27,7	2,8	0,31	0,03
5	12,9	1,3	0,45	0,05	0,075	0,008
10	8,7	0,9	0,35	0,04	0,028	0,003
20	4,8	0,5	0,19	0,02	0,97e-3	9,9e-5
40	1,0	0,1	0,026	0,003	0,36e-3	3,7e-5

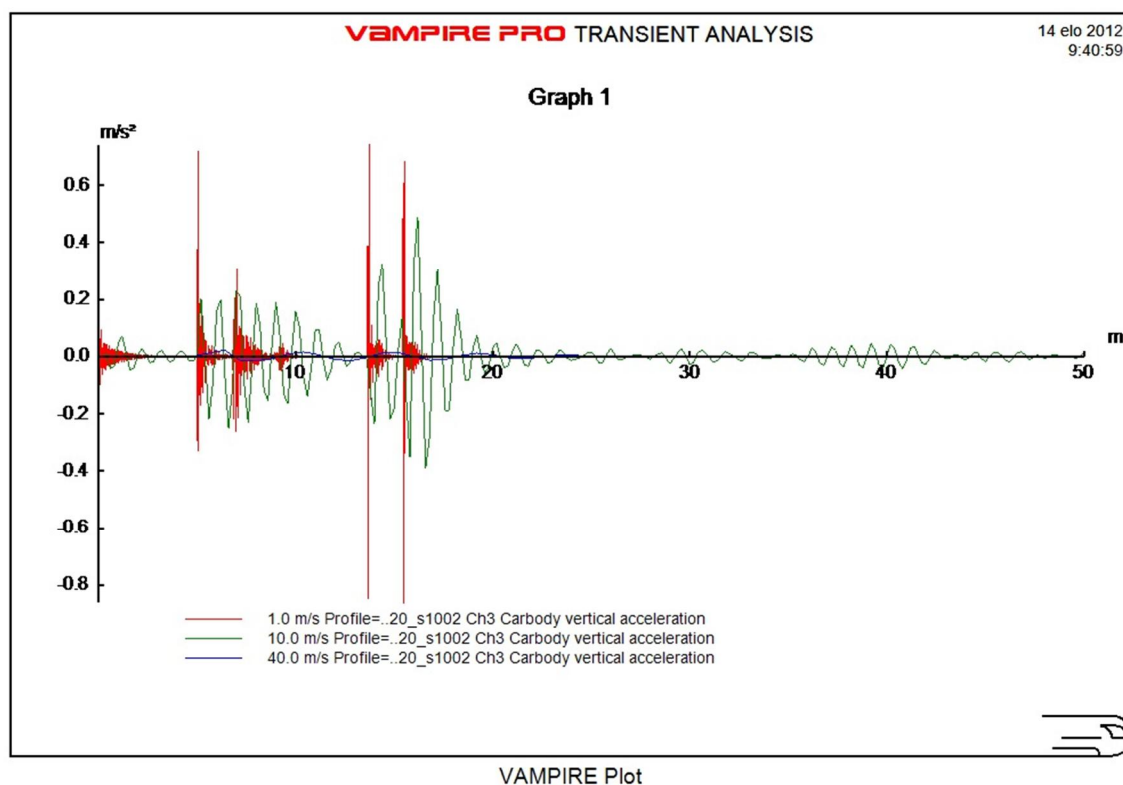
Seuraavaksi tarkasteltiin kiskoatkoksen aiheuttamia kiihtyvyyksiä Vok–vaunulle, jota on käytetty tavaravaunun esimerkkinä. Kiskoatkos on sijoitettu radalla edelleen viiden metrin kohdalle. Tavaravaunu on lyhyempi kuin matkustajavaunu, joten anturoitu pyöräkerta kulkee kiskoatkoksesta aiemmin. Anturit on sijoitettu jälleen taaimpaan pyöräkertaan, eli anturoitu pyöräkerta kulkee kiskopompusta noin 15,5 metrin kohdalla. Kuvassa 6.27 on esitetty pyöräkerran pystykiihtyvyydet tavaravaunulle nopeuksilla 1 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 20 m/s ja 40 m/s.



Kuva 6.27. Tavaravaunun pyöräkerran pystykiihtyvyydet kiskoatkoskohdissa nopeuksilla 1 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 20 m/s ja 40 m/s.

Myös tavaravaunun tapauksessa pienemmillä nopeuksilla maksimikiihtyvyyssamplitudit ovat suurempia. Tarkastetaan vielä, millaisia kiihtyvyyksiä kiskoatkoskohta aiheuttaa tavaravaunun runkoon.

Kuvassa 6.28 on esitetty vaunun pystykiihtyvyydet nopeuksilla 1 m/s, 10 m/s ja 40 m/s. Osa aiemmin käytetyistä nopeuksista on jätetty kuvasta pois, jotta kuvaaja olisi selkeämmin luettavissa. Vaunun kiihtyvyysskuaajassa arvot alkavat poiketa normaali-tasosta jälleen jo ensimmäisen pyöräkerran ylittäessä kiskoatkoksen, eli suunnilleen viiden metrin kohdalla. Nopeudella 1 m/s saadut kiihtyvyyssamplitudit ovat selvästi suurempia kuin nopeudella 10 m/s saadut kiihtyvyyssamplitudit. Nopeudella 40 m/s kiihtyvyyssamplitudit ovat jo niin pieniä, että niitä ei erota kuvasta. Toisaalta nopeudella 1 m/s saadut kiihtyvyydet vaimenevat nopeammin kuin muut. Tässäkin tapauksessa vaunun kiihtyvyydet pienenevät siis selvästi ajonopeuden kasvaessa ja pienimmällä testatulla ajonopeudella värähtely vaimenee nopeimmin.



Kuva 6.28. Tavaravaunun vaunurungon pystykiihtyvyydet kiskoatkoskohdassa nopeuksilla 1 m/s, 10 m/s ja 40 m/s.

Tarkemmat pystykiihtyvyyssamplitudien maksimiarvot arvot löytyvät taulukosta 6.10.

Taulukko 6.10. Tavaravaunun pyöräkerran ja vaunun pystykiihtyvyyden maksimiarvot kiskoatkoksen kohdalla.

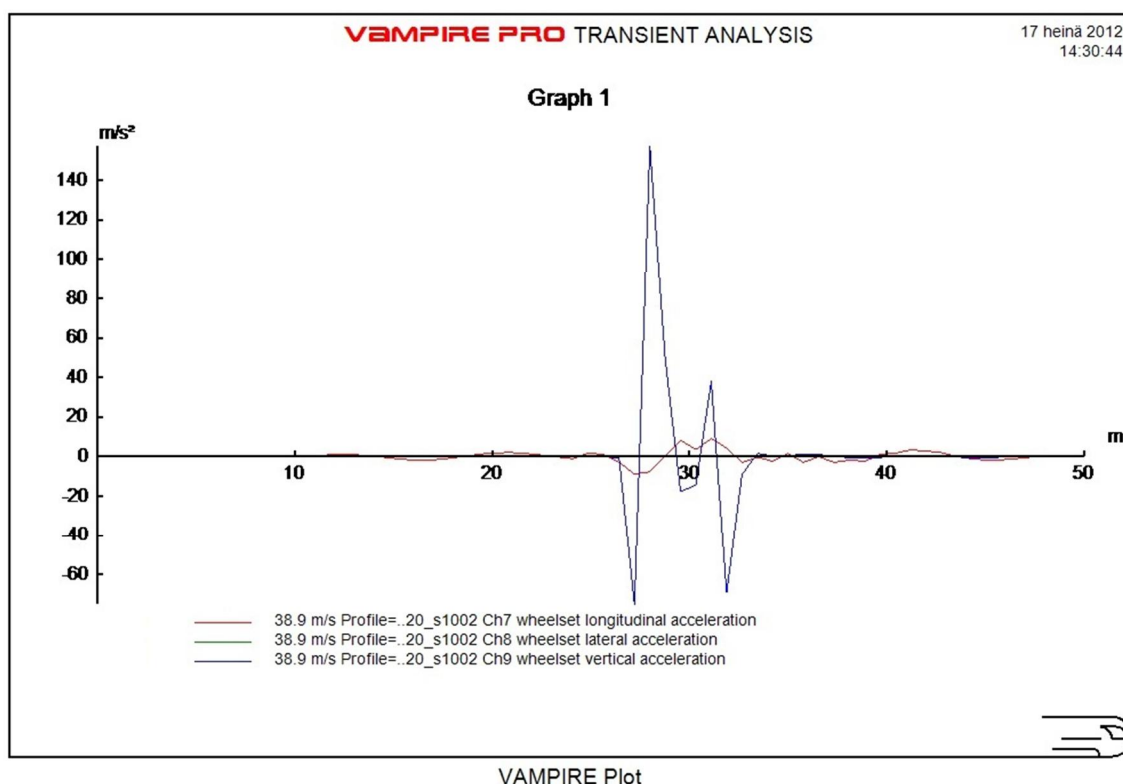
Nopeus (m/s)	Pystykiihtyvyyden maksimiarvo pyöräkerrassa		Pystykiihtyvyyden maksimiarvo vaunussa	
	(m/s ²)	(g)	(m/s ²)	(g)
1	170,5	17,4	0,86	0,088
5	15,6	1,6	0,59	0,060
10	2,6	0,26	0,49	0,050
20	1,6	0,16	0,27	0,028
40	0,02	0,002	0,022	0,002

Taulukon avulla nähdään selvästi pystykiihtyvyyden maksimiarvojen pieneneminen nopeuden laskiessa. Kun nopeus on 5 m/s tai enemmän, kiihtyvyyksien arvot eivät juuri poikkea mittausvaunulle saadusta tyypillisestä tasaisen radan kiihtyvyydestä.

6.3.3 Kiskopomppu

Kiskopomppun mallina on käytetty tšekkiläistä kiskopomppua, jonka korkeus on 24 mm ja kulmamuuutos noin 11° (kuva 5.6). Tarkoituksena oli vertailla kiskopomppun aiheuttamia värähtelyitä vaihteiden ja kiskoatkosten aiheuttamiin värähtelyihin. Vaihteessa mitattiin maksimivärähtelyamplitudeja mittausvaunun pyöräkerralle, telille ja vaunurungolle, joten myös kiskoatkoksen ja kiskopomppun tapauksessa keskityttiin maksimivärähtelyamplitudeihin.

Aluksi tarkasteltiin kiskopomppun aiheuttamia maksimikiihtyvyyksiä Ex-vaunulle, jota on käytetty matkustajavaunun esimerkkinä. Kiskopomppun yli on ajettu ensin nopeudella 38,9 m/s, joka vastaa nopeutta 140 km/h. Kuvassa 6.29 on esitetty kiihtyvyydet matkustajavaunun pyöräkerrassa vaunun ajaessa pomppun yli. Kuvan vaaka-akselilla oleva matka kuvaa ensimmäisen pyöräkerran etäisyyttä lähtöpisteestä. Kiskopomppu on sijoitettu radalla viiden metrin kohdalle molemmilla kiskoilla. Anturit on sijoitettu taaimpaan pyöräkertaan, eli anturoitu pyöräkerta kulkee kiskopomppun yli noin 26,6 metrin kohdalla.



Kuva 6.29. Kiskopomppun aiheuttamat kiihtyvyydet matkustajavaunun pyöräkerrassa nopeudella 140 km/h.

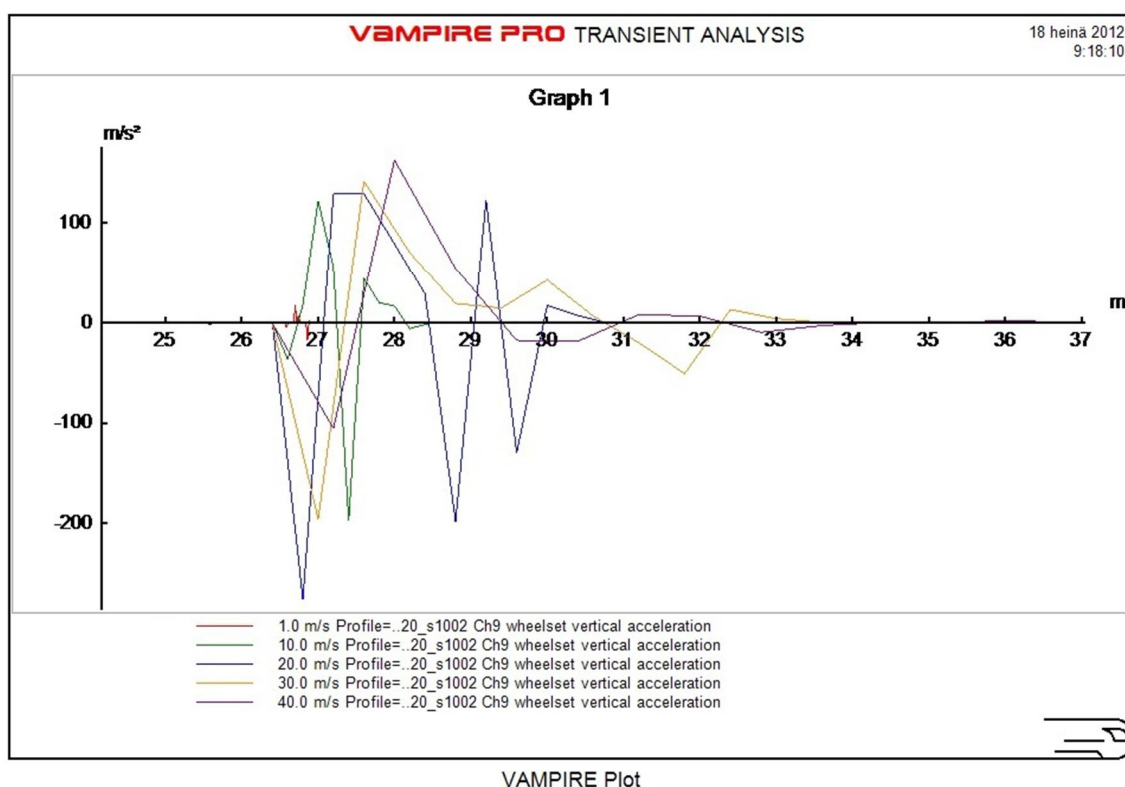
Kuvasta 6.29 huomataan, että pyöräkerran pystykiihtyvyys on selvästi suurempi kuin poikittaiskiihtyvyys tai radansuuntainen kiihtyvyys. Pyöräkerran pystysuuntaisen kiihtyvyyden arvo on $157,6 m/s^2$ eli noin 16,1 g. Telissä suurin kiihtyvyys on myös pystysuunnassa ja sen arvo on $144,8 m/s^2$ eli noin 14,8 g. Vaunussa suurin kiihtyvyys on ra-

dansuunnassa $1,9 \text{ m/s}^2$ eli noin $0,2 \text{ g}$. Telin ja vaunun kiihtyvyydet ovat jo melko lähellä vaihteissa saatuja kiihtyvyyksiä, joten kiskopompun suhteen on testattu vielä pienempää ajonopeutta.

Seuraavaksi testattiin nopeutta 20 m/s eli 72 km/h . Pyöräkerran suurimmaksi kiihtyvyyssamplitudiksi pystysuunnassa saatiin tällöin $276,3 \text{ m/s}^2$ eli noin $28,2 \text{ g}$. Telin suurin kiihtyvyys oli pystysuunnassa $81,0 \text{ m/s}^2$ eli noin $8,26 \text{ g}$. Vaunun suurimmaksi kiihtyvyydeksi saatiin pystysuunnassa $1,52 \text{ m/s}^2$ eli noin $0,15 \text{ g}$.

Kun nopeudeksi valittiin 1 m/s eli $3,6 \text{ km/h}$, pyöräkerran kiihtyvyyden suurimmaksi arvoksi saatiin pystysuunnassa $17,5 \text{ m/s}^2$ eli noin $1,8 \text{ g}$. Telin kiihtyvyyden suurin arvo oli pystysuunnassa $7,1 \text{ m/s}^2$ eli noin $0,7 \text{ g}$. Vaunun kiihtyvyyden suurimmaksi arvoksi saatiin pystysuunnassa $0,54 \text{ m/s}^2$ eli noin $0,05 \text{ g}$.

Suurimmat värähtelyt tapahtuivat lähes poikkeuksetta pystysuunnassa, joten myös kiskopompun osalta tarkastellaan tästä eteenpäin vain pystysuuntaisia kiihtyvyyksiä. Kuvassa 6.30 on esitetty pyöräkerran pystykiihtyvyydet nopeuksilla 1 m/s , 10 m/s , 20 m/s , 30 m/s ja 40 m/s .

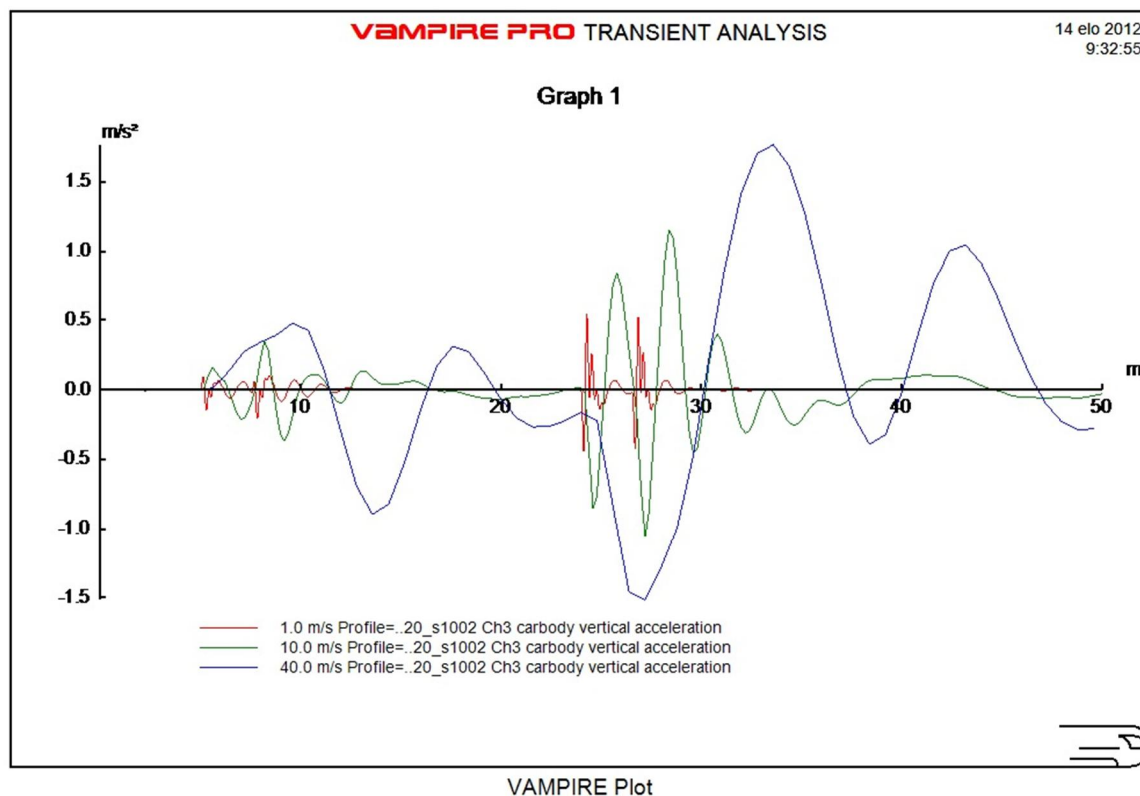


Kuva 6.30. Kiskopompun aiheuttamat matkustajavaunun pyöräkerran pystykiihtyvyydet nopeuksilla 1 m/s , 10 m/s , 20 m/s , 30 m/s ja 40 m/s .

Pyöräkerran värähtelyissä tapahtuu selviä muutoksia vasta anturoidun pyöräkerran ylitäessä pompun noin $26,6$ metrin kohdalla. Kuvasta 6.30 huomataan, että pyöräkerran pystykiihtyvyyssamplitudit pysyvät suuremmilla nopeuksilla melko samoina. Suurin pystykiihtyvyyden arvo on $276,3 \text{ m/s}^2$ eli noin $28,2 \text{ g}$. Värähtelyn aallonpituus kuitenkin

kasvaa selvästi nopeuden kasvaessa. Lisäksi nopeuden kasvaessa värähtely vaimenee hitaammin.

Seuraavaksi katsottiin vielä, miten erilaiset ajonopeudet vaikuttavat matkustajavaunun rungon värähtelyihin. Kuvassa 6.31 on esitetty vaunun pystykiihtyvyydet nopeuksilla 1 m/s, 10 m/s ja 40 m/s. Osa aiemmin käytetyistä nopeuksista on jätetty kuvasta pois kuvaajan selkeyttämiseksi.



Kuva 6.31. Kiskopompin aiheuttamat matkustajavaunun vaunurungon pystykiihtyvyydet nopeuksilla 1 m/s, 10 m/s ja 40 m/s.

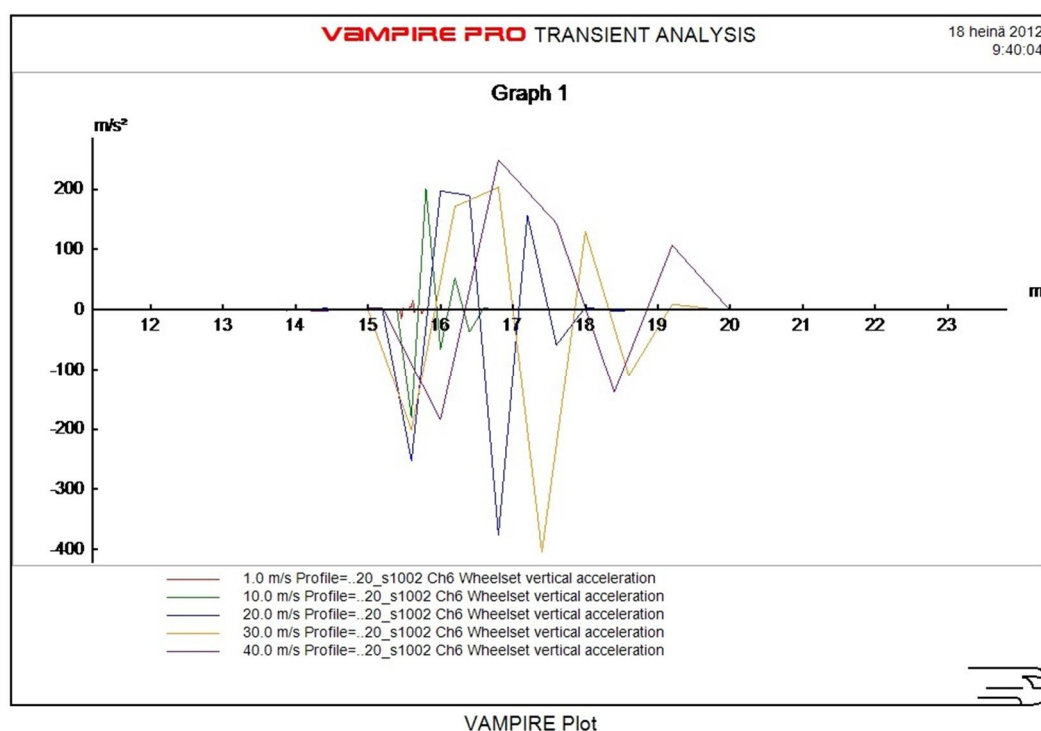
Vaunun kiihtyvyyksissä havaitaan muutoksia jo viiden metrin kohdalla, jolloin ensimmäinen pyöräkerta ylittää pompin. Suurimmat kiihtyvyydet saadaan kuitenkin vasta viimeisen pyöräkerran ylittäessä pompin noin 26,6 metrin kohdalla, sillä vaunun anturointi on takimaisen pyöräkerran kohdalla. Kun nopeus on hyvin alhainen, kuten kuvan 6.31 tapauksessa 1 m/s, havaitaan kiihtyvyysskuaajasta selvästi jokaisen neljän pyöräkerran ylityskohta pompulle. Suuremmilla nopeuksilla eri pyöräkertojen aiheuttamia värähtelyitä on vaikea erottaa toisistaan, sillä värähtelyamplitudi on suurempi ja värähtely jatkuu pidempään. Suurin pystykiihtyvyyden arvo matkustajavaunussa on 2,32 m/s² eli noin 0,24 g. Tarkemmat kiihtyvyyssarvot on esitetty taulukossa 6.11.

Taulukko 6.11. Matkustajavaunun pyöräkerran, telin ja vaunun pystykiihtyvyyden maksimi-
arvot kiskopomppun kohdalla.

Nopeus (m/s)	Pystykiihtyvyyden maksimi- arvo pyöräkerrassa		Pystykiihtyvyyden maksimi- arvo telissä		Pystykiihtyvyyden maksimi- arvo vaunussa	
	(m/s ²)	(g)	(m/s ²)	(g)	(m/s ²)	(g)
1	17,5	1,8	7,1	0,7	0,54	0,05
10	196,6	20,0	84,6	8,6	1,15	0,12
20	276,3	28,2	81,0	8,3	1,52	0,16
30	195,7	19,9	121,0	12,3	2,32	0,24
40	162,5	16,6	141,3	14,4	1,77	0,18

Taulukosta nähdään, että muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta kiskopomppun aiheuttamat värähtelyt kasvavat nopeuden kasvaessa. Kiihtyvyyssamplitudien kasvu ei kuitenkaan ole suoraan verrannollinen nopeuden kasvuun.

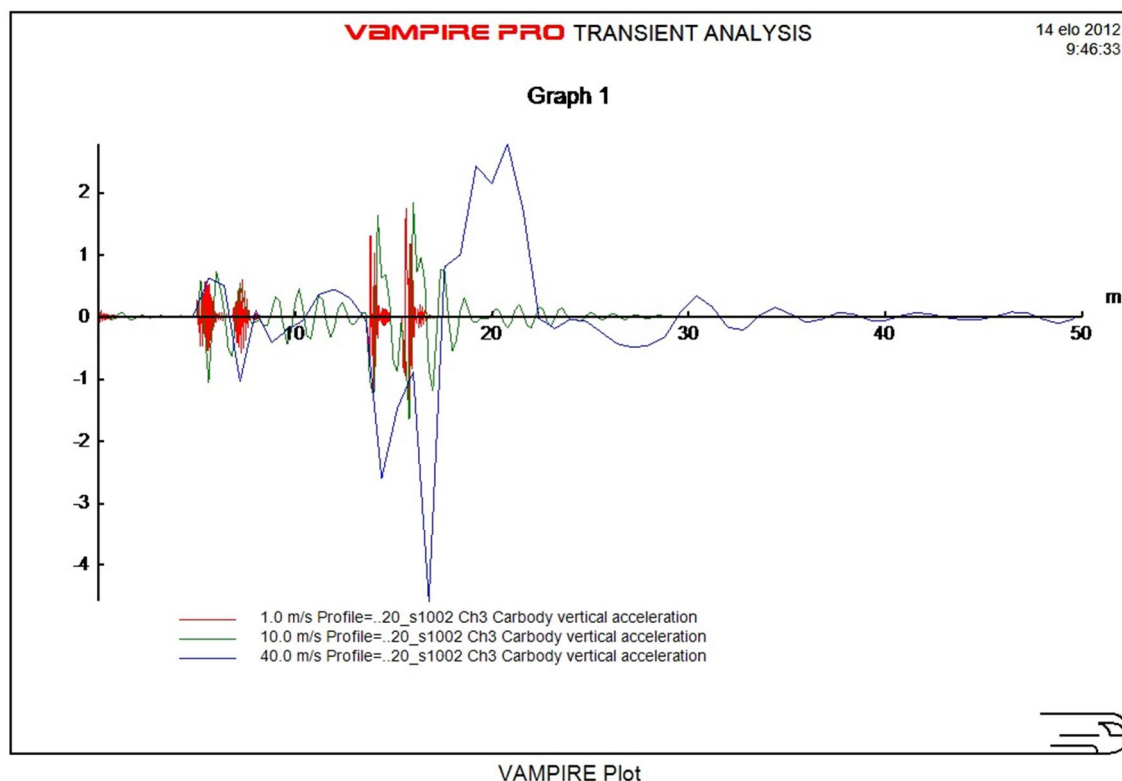
Seuraavaksi tarkasteltiin kiskopomppun aiheuttamia kiihtyvyyksiä Vok–vaunulle, jota on käytetty tavaravaunun esimerkkinä. Kiskopomppu on jälleen sijoitettu radalla viiden metrin kohdalle. Tavaravaunu on lyhyempi kuin matkustajavaunu, joten anturoitu pyöräkerta kulkee pomppusta aiemmin. Anturit on sijoitettu jälleen taaimpaan pyöräkertaan, eli anturoitu pyöräkerta kulkee kiskopomppusta noin 15,5 metrin kohdalla. Kuvassa 6.32 on esitetty pyöräkerran pystykiihtyvyydet tavaravaunulle nopeuksilla 1 m/s, 10 m/s, 20 m/s, 30 m/s ja 40 m/s.



Kuva 6.32. Kiskopomppun aiheuttamat tavaravaunun pyöräkerran pystykiihtyvyydet nopeuksilla 1 m/s, 10 m/s, 20 m/s, 30 m/s ja 40 m/s.

Myös tavaravaunulla värähtelyn aallonpituus kasvaa ja värähtely vaimenee hitaammin nopeuden kasvaessa. Nopeus ei kuitenkaan suuremmilla nopeuksilla vaikuta värähtelyn amplitudiin. Suurin pystykiihtyvyyden arvo on 405 m/s^2 eli noin 41,3 g. Tämä on selvästi suurempi kuin vastaava arvo matkustajavaunulle.

Tavaravaunun tapauksessa tarkasteltiin vielä vaunurunkoon kohdistuvia kiihtyvyyksiä eri nopeuksilla. Kuvassa 6.33 on tavaravaunun pystykiihtyvyydet nopeuksilla 1 m/s, 10 m/s ja 40 m/s. Osa pyöräkerran kuvaajassa käytetyistä nopeuksista on jätetty pois kuvaajan selkeyttämiseksi.



Kuva 6.33. Kiskopompon aiheuttamat tavaravaunun vaunurungon pystykiihtyvyydet nopeuksilla 1 m/s, 10 m/s ja 40 m/s.

Vaunun kiihtyvyyksissä huomataan jälleen muutoksia jo viiden metrin kohdalla, kun ensimmäinen pyöräkerta ylittää pompun. Suurimmat muutokset tapahtuvat anturoidun pyöräkerran ylittäessä pompun noin 15,5 metrin kohdalla. Tavaravaunussa suurin pystykiihtyvyyden arvo on $4,8 \text{ m/s}^2$ eli noin 0,49 g. Tämä on noin kaksinkertainen verrattuna vastaavaan matkustajavaunun arvoon. Tarkemmat pystykiihtyvyyksien arvot löytyvät taulukosta 6.12. Arvoista huomataan, että muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta kiskopompon aiheuttamat värähtelyt kasvavat jälleen nopeuden kasvaessa.

Taulukko 6.12. Tavaravaunun pyöräkerran ja vaunun pystykiihtyvyyden maksimiarvot kiskopompun kohdalla.

Nopeus (m/s)	Pystykiihtyvyyden maksimiarvo pyöräkerrassa		Pystykiihtyvyyden maksimiarvo vaunussa	
	(m/s ²)	(g)	(m/s ²)	(g)
1	16,2	1,7	1,74	0,18
10	201,4	20,5	1,83	0,19
20	376,1	38,4	3,82	0,39
30	405,0	41,3	4,79	0,49
40	249,0	25,4	4,59	0,47

Vaunutyyppillä on merkittävä vaikutus erilaisten epäjatkuvuuskohtien aiheuttamaan värähtelyyn vaunussa. Sekä kiskoatkoksen että kiskopompun tapauksessa tavaravaunuun kohdistuvat maksimikiihtyvyyssamplitudit ovat suuremmat kuin matkustajavaunun tapauksessa. Tavaravaunun värähtelyamplitudit ovat yleensä noin 1–4-kertaisia matkustajavaunun värähtelyihin verrattuna. Mittausvaunu poikkeaa jousitus- ja massaominaisuuksiltaan hieman sekä matkustajavaunun esimerkkinä käytetystä Ex-vaunusta että tavaravaunun esimerkkinä käytetystä Vok-vaunusta. Tämän vuoksi laskuissa saatuja kiihtyvyyssarvoja ei voi suoraan verrata mittauksissa saatuihin kiihtyvyyssarvoihin. Mittausvaunun jousitusominaisuudet saatiin kuitenkin selville aivan työn loppuvaiheessa, ja näiden tietojen perusteella laskelmat tehtiin myös mittausvaunulle. Mittausvaunun kiihtyvyyssarvot sijoittuvat samalle tasolle kuin esimerkkeinä käytettyjen matkustaja- ja tavaravaunujen kiihtyvyyssarvot.

Mallinnuksessa saatujen kiihtyvyysskuaajien mukaan tasaisella rataosuudella sekä matkustaja- että tavaravaunun kiihtyvyydet ovat hyvin pieniä. Ennen kiskon epäjatkuvuuskohtien ylittämistä pystykiihtyvyydet olivat pyöräkerrassa korkeintaan 0,001 m/s² eli noin 0,0001 g. Mittauksissa pyöräkerran pystykiihtyvyydet olivat samalla nopeudella (140 km/h) tasaisella rataosuudella noin 10–15 g. Todellisuudessa kiihtyvyydet voivat siis etenkin suoralla ja tasaisella rataosuudella olla selvästi suurempia kuin mallissa. Mallinnuksessa on kyseessä ideaalitilanne, eikä siinä ole otettu huomioon kiskon lisäksi mitään muita vaunuun vaikuttavia ulkoisia voimia.

Laskuissa käytetyt epäjatkuvuuskohdat olivat hyvin erityyppisiä. Kiskoatkoksen tapauksessa pystysuuntainen poikkeama suuntautuu kiskosta alaspäin ja kiskopompun tapauksessa ylöspäin. Lisäksi kiskoatkoksen tapauksessa poikkeaman pituus oli vain 21 mm, kun kiskopompun tapauksessa poikkeama oli selvästi pidempi, 285 mm. Kiskoatkoksessa vaunut eivät suuremmilla nopeuksilla selvästi ehtineet reagoimaan epäjatkuvuuskohtaan ja siksi värähtely jäi melko pieneksi. Kiskopomppuun vaunut reagoivat kaikilla testatuilla nopeuksilla. Laskujen perusteella voidaan olettaa, että lyhyen epäjatkuvuuskohdan tapauksessa ylöspäin suuntautuva kiskon pystysuuntainen poikkeama vaikuttaa junan värähtelyihin enemmän kuin alaspäin suuntautuva poikkeama. Epäjatkuvuuskohtia pitäisi kuitenkin testata useita erimittaisia, jotta asialle saataisiin varmuus.

Vaihteita vastaavat kiihtyvyyssamplitudit saavutetaan kuitenkin todennäköisesti helpommin kiskoon kiinnitetyn kiskopompun kuin kiskoatkoksen tai kiskoon tehdyn loven avulla.

6.4 Pohdinta epäjatkuvuuskohtien vaikutuksista

Työssä oli tarkoituksena tarkastella erilaisten raiteen epäjatkuvuuskohtien aiheuttamia kiihtyvyyksiä yli kulkevissa junissa. Näiden kiihtyvyyksien avulla voidaan päätellä, mitkä epäjatkuvuuskohdat aiheuttavat todennäköisimmin vaunuun kertyneen lumen irtoamisen. Epäjatkuvuuskohdan aiheuttaman herätteen suuruus riippuu junan massa- ja jousitusominaisuuksista sekä junan nopeudesta. Lumen irtoamiseen vaikuttaa värähtelyn lisäksi se, kuinka lujasti lumi on kiinnittynyt junan runkoon.

6.4.1 Epäjatkuvuuskohtien aiheuttamat kiihtyvyydet

Junaan kohdistuvia kiihtyvyyksiä on tutkittu mittaamalla kahdessa erityyppisessä vaihteessa sekä tasoristeysten ja siltojen kohdilla. Lisäksi laskennallisesti on tutkittu kiskoatkoskohdan ja kiskopompun aiheuttamia kiihtyvyyksiä. Mittaukset on tehty mittausvaunulla A17 ja laskennalliset tulokset on saatu sekä matkustajavaunulle (Ex-vaunu) että tavaravaunulle (Vok-vaunu). Tuloksia ei voida suoraan verrata keskenään, sillä eri vaunutyypin massa- ja jousitusominaisuudet eroavat toisistaan. Mittausvaunun värähtelyt sijoittuvat kuitenkin suunnilleen samalle tasolle kuin matkustaja- ja tavaravaunujen värähtelyt.

Mittaustuloksista saatiin selville, että yleisesti ottaen vaihteet aiheuttavat junaan suurimmat kiihtyvyyssarvot. Vaihteen aiheuttamat kiihtyvyydet junan eri osissa ovat noin 4–10-kertaiset verrattuna suoran jatkuvan rataosuuden aiheuttamiin kiihtyvyyksiin, eli mittausvaunun tapauksessa esimerkiksi vaunurungon maksimipystykiihtyvyydet olivat vaihteessa noin 0,1g–0,5g. Vaihteen aiheuttama värähtely riippuu siitä, mitä nopeutta vaihteeseen ajetaan. Suuremmilla nopeuksilla vaihde aiheuttaa junaan suuremmat maksimikiihtyvyyssarvot.

Tasoristeysten aiheuttamat kiihtyvyydet ovat mittaustulosten perusteella noin 1–10-kertaiset radan normaaliin kiihtyvyytasoon verrattuna, eli keskimäärin tasoristeykset aiheuttavat vaunuun hieman pienempiä maksimikiihtyvyyksiä kuin vaihteet. Siltojen aiheuttamat maksimikiihtyvyydet olivat tässä mittauksessa 1–4-kertaiset radan normaaliin kiihtyvyytasoon verrattuna, eli sillat aiheuttavat tämän mittauksen perusteella keskimäärin pienempiä maksimivärähtelyitä kuin vaihteet tai tasoristeykset.

Laskentatuloksista käy ilmi kiskoatkoskohdan ja kiskopompun väliset erot. Molemmat toimivat herätteenä vaunun värähtelylle, mutta kiskopomppu aiheuttaa selvästi suuremmat maksimikiihtyvyydet vaunuun. Kiskopompun tapauksessa junan nopeuden kasvaessa värähtelyamplitudi kasvaa tai amplitudin pysyessä ennallaan värähtelyn aallonpituus kasvaa. Lisäksi nopeuden kasvaessa värähtely vaimenee hitaammin. Matkustajavaunun tapauksessa kiskopompun aiheuttama vaunurungon pystykiihtyvyyden mak-

simiarvo on $2,32 \text{ m/s}^2$ eli noin $0,24 \text{ g}$. Tavaravaunun tapauksessa kiskopompun aiheuttama vaunurungon pystykiihtyvyyden maksimiarvo on $4,80 \text{ m/s}^2$ eli noin $0,49 \text{ g}$. Molemmat arvot on saatu nopeudella 30 m/s ja sijoittuvat samaan luokkaan kuin vaihteiden aiheuttamat vaunurungon pystykiihtyvyyden maksimiarvot mittausvaunulle.

Kiskoatkoksen tapauksessa maksimivärähtelyamplitudi pienenee selvästi nopeuden kasvaessa. Matkustajavaunun tapauksessa vaunurungon pystykiihtyvyyden maksimiarvo on $0,31 \text{ m/s}^2$ eli noin $0,03 \text{ g}$. Tavaravaunun tapauksessa vaunurungon pystykiihtyvyyden maksimiarvo on $0,86 \text{ m/s}^2$ eli noin $0,09 \text{ g}$. Molemmat arvot on saatu nopeudella 1 m/s , ja suuremmilla nopeuksilla arvot ovat vielä selvästi pienempiä. Nämä arvot ovat sekä matkustaja- että tavaravaunun tapauksessa pienempiä kuin vaihteiden aiheuttamat vaunurungon pystykiihtyvyyden maksimiarvot mittausvaunulle.

Laskentatulosten suhteen täytyy huomioda, että mallinnuksessa on kyse kiskon ja vaunun idealisoinnista. Todellisessa tilanteessa kiskossa tai pyörässä voi olla epätasaisuuksia ja vikoja, eivätkä niiden profiilit siten aina vastaa ideaaliprofiileja. Vaunuun vaikuttaa todellisuudessa aina myös asioita, joita mallissa ei ole huomioitu. Näitä ovat esimerkiksi tuuli ja vaunun epätasaisesti jakautunut massa. Lisäksi mallinnuksessa on ollut mukana vain yksi junavaunu. Todellisessa värähtelysteemissä on mukana useita vaunuja, ja niiden värähtelykäyttäytyminen on kytketty toisiinsa. Tämän vuoksi voidaan turvallisesti verrata ainoastaan mallinnuksessa saatuja kiihtyvyyssarvoja keskenään ja toisaalta mittauksessa saatuja kiihtyvyyssarvoja keskenään. Mallinnuksen avulla on kuitenkin mahdollista tarkastella myös monimutkaisempia värähtelysteemejä, jolloin tuloksista saadaan tarkempia.

6.4.2 Lumen irtoaminen junakalustosta

Tässä työssä kiihtyvyyksiä on tarkasteltu maksimikiihtyvyyssamplitudien avulla. Oletuksena laskuissa on siis ollut, että yksi suuri kiihtyvyyden arvo aiheuttaisi lumen irtoamisen. Todellisuudessa myös värähtelyn taajuudella ja kestolla on merkitystä lumen irtoamiseen. Mikäli epäjatkuvuuskohta herättää vaunun ominaisvärähtelyn, lumen irtoamiseen ei välttämättä tarvita yksittäistä suurta kiihtyvyyssamplitudia. Pitkäkestoisen värähtelyn vaikutusta lumen irtoamiseen ei ole tämän työn puitteissa tarkasteltu lainkaan.

Luvussa 3.2 tarkasteltiin lumen ja jään irtoamista junasta yhtälön avulla. Siinä lumen ja jään irrottamiseen tarvittavalle kiihtyvyydelle saatiin kaavaksi

$$a = \frac{\tau_a A - mg}{m} \quad (6.1)$$

missä

τ_a on lumen tai jään adhesiivinen leikkauslujuus

A on ala, jolla lumimassa on kiinnittynyt junavaunuun

m on lumen massa

a on lumimassaan kohdistuva kiihtyvyys

Kaavasta 6.1 nähdään, että mahdollisimman painava ja pieneltä pinta-alalta junassa kiinni oleva lumimassa vaatii pienimmän kiihtyvyyden irrotukseen. Toisaalta lumen adheesiolujuus riippuu lumen tiheydestä, jolloin raskaampi lumimassa voikin olla tiukemmin kiinnittynyt junan alustaan. Siksi on vaikea sanoa, irtoaako junasta helpommin raskas vai kevyt lumimassa. Oleellista tarkasteluissa on kuitenkin se pinta-ala, jolla lumimassa on kiinnittynyt junan alustaan. Lumen irrottamiseksi tarvittava kiihtyvyys on lähes suoraan verrannollinen alaan, jolla lumimassa on kiinnittynyt junan alustaan. Tämä verrannollisuus pätee, kun $a \gg g$.

Lumen ja jään erottelu toisistaan on vaikeaa, ja siksi tarkasteluissa on puhuttu usein yksinkertaisesti vain lumesta. Lumella on kuitenkin kaikissa tilanteissa tarkoitettu lumen lisäksi myös lumijäätä ja jäätä. Junaan kertynyt aines on yleensä lunta, mutta se voi muuttua lämpötila- tai painemuutosten johdosta jääksi. Siksi tarkasteluissa täytyy huomioida, että junan alustasta voi irrota lumen lisäksi myös lumijäätä tai jäätä.

Taulukossa 6.13 on tarkasteltu esimerkkinä useampia tapauksia, joissa lumen massaa, adhesiivista leikkauslujuutta ja kiinnittymispinta-alaa vaihdellaan. Taulukossa on kerrottu kaavalla 6.1 saatu kiihtyvyyden arvo kahdessa eri yksikössä. Taulukon neljä ensimmäistä riviä kuvaavat $0,1 \times 0,1 \times 0,1$ m -kokoisen lumimassan irtoamiseen tarvittavia kiihtyvyyksiä eri adheesiolujuuksille. Lumen tiheytenä on käytetty tässä tapauksessa jään tiheyttä eli $\rho = 917 \text{ kg/m}^3$. Myös adheesiolujuuden arvot on valittu jään tai lumijään adheesiolujuuksien joukosta. Taulukon alimmilla riveillä adheesiolujuuden arvo on pidetty vakiona, mutta muita arvoja on muutettu.

Taulukko 6.13. Lumen irtoamiseen vaadittava kiihtyvyyden arvo eri muuttujien arvoilla.

τ_a (MPa)	A (m ²)	m (kg)	a (m/s ²)	a (g)
0,02	0,01	0,9	208	21
0,1	0,01	0,9	1081	110
0,4	0,01	0,9	4352	444
0,7	0,01	0,9	7624	777
0,4	0,05	0,9	21800	2223
0,4	0,05	5	3990	407
0,4	0,05	10	1990	203
0,4	0,5	10	19990	2038
0,4	0,5	15	13324	1359

Lumen irrottamiseen vaadittaisiin kiinnittyneen lumimassan ominaisuuksista riippuen noin 20–2000 g:n kiihtyvyyksiä. Suurin mittauksissa ja laskuissa saatu kiihtyvyyden arvo on pyöräkerralle saatu pystykiihtyvyys 280 g. Tällainen kiihtyvyyden arvo riittäisi

useissa tapauksissa lumen irtoamiseen. Eniten lunta kertyy kuitenkin teliin ja vaunurunkoon, ja suurin mittauksissa saatu kiihtyvyyden arvo on telille 46 g ja vaunurungolle vain 0,8 g. Pelkkä raiteen epäjatkuvuuskohtien aiheuttama yksittäinen kiihtyvyyshuippu ei siis kaavan 6.1 perusteella riitä irrottamaan lunta vaunurungosta, ellei lumi ole kiinnittynyt rakenteeseen erittäin heikosti. Raiteen epäjatkuvuuskohta voi kuitenkin aiheuttaa junarunkoon taipumia, jotka saattavat johtaa lumen murtumiseen. Tällöin pienemmilläkin kiihtyvyyden arvoilla lumi voi irrota vaunusta. Lumen ja jään murtamiseen vaadittavista taipumista kerrottiin aiemmin luvussa 3.2.

Käytännössä lumen irrottamiseen ei kuitenkaan tarvita niin suurta kiihtyvyyttä kuin kaavan 6.1 avulla on laskettu. Kuten luvussa 2 aiemmin todettiin, adheesio irtoaa progressiivisesti alkaen eniten rasitetusta kohdasta ilman, että täysi adheesiolujuus vaikuttaisi koko kosketuspinnalla samanaikaisesti (Holtinen et al. 1998).

7 YHTEENVETO JA JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSET

Tässä tutkimuksessa oli tavoitteena selvittää raiteen epäjatkuvuuskohtien ja junakalustoon kiinnittyneen lumen irtoamisen välistä yhteyttä. Lumi kiinnittyy junakalustoon adheesiovoimilla, jotka riippuvat merkittävästi esimerkiksi lumen rakenteesta ja ulkoilman lämpötilasta. Tämän vuoksi adheesiolujuudelle ei voida antaa tiettyä vakioarvoa, vaan adheesiolujuus täytyy päätellä tapauskohtaisesti. Kun lämpötila on tarpeeksi lähellä lumen sulamispistettä, lumi voi irrota junakalustosta adhesiivisesti lumen ja teräksen liitoskohdasta. Lämpötilan ollessa selvästi pakkasen puolella, murtuminen tapahtuu todennäköisesti lumen sisällä, jolloin lumen sisäiset koheesiosidokset katkeavat.

Työssä tarkasteltiin lumen irtoamista kahdessa ongelmalliseksi todetussa vaihteessa. Näissä mittauksissa saatiin selville, että lumen irtoaminen riippuu selvästi ulkoilman lämpötilasta. Eniten lunta irtosi lämpötilan ollessa 0 °C:n tuntumassa tai hieman sen alapuolella. Mittauksissa ilmeni myös yhteys junasta irronneen lumen määrän ja junan nopeuden välille. Keravan vaihteen tapauksessa junan nopeuden yhteys irronneen lumen määrään oli erittäin selvä: junan nopeuden kasvaessa lunta irtosi junasta enemmän. Madesjärven vaihteessa sen sijaan yhteys ei ollut aivan yhtä ilmeinen. Kiskon epäjatkuvuuskohdan aiheuttamien iskuvoimien on kuvattu olevan suoraan verrannollisia junan nopeuteen. Siksi myös vaihteen junaan aiheuttama herätevaikutus on suurempi junan nopeuden kasvaessa. Herätevaikutuksen kasvaessa lumen irtoaminen junakalustosta on todennäköisempää.

Samalla tarkasteltiin matkustaja- ja tavarajunien eroja junakalustoihin kertyneen lumen irtoamisessa. Tässä tutkimuksessa eroa matkustaja- ja tavarajunien välillä ei juuri havaittu, mutta erityyppisiin junakalustoihin kertyneen lumen irtoamista voitaisiin jatkossa tutkia vielä tarkemmin.

Työssä tutkittiin myös junan värähtelykäyttäytymistä Helsinki–Joensuu-välisellä rataosuudella. Vaunun pyöräkertaan, teliiin ja vaunurunkoon asennettujen kiihtyvyysantureiden avulla saatiin selville junan kiihtyvyydet erilaisissa radan epäjatkuvuuskohdissa. Mittaustuloksista tutkittiin erityisesti kahden eri vaihdetyypin aiheuttamia kiihtyvyyksiä. Näiden perusteella selvisi, että vaihteen epäjatkuvuuskohdan herätteen aiheuttamat kiihtyvyydet junakalustossa riippuvat merkittävästi junan nopeudesta. Vaihteen aiheuttamat kiihtyvyydet junan pyöräkerrassa, telissä ja vaunurungossa kasvavat junan nopeuden kasvaessa. Työssä tarkasteltiin vaihteiden lisäksi myös tasoristeysten ja siltojen epäjatkuvuuskohtien aiheuttamia kiihtyvyyksiä junakalustossa. Keskimääräisesti näistä kolmesta erityyppisestä epäjatkuvuuskohdasta vaihteet aiheuttivat junakalustoon suurimmat maksimikiihtyvyysamplitudit. Voidaan siis sanoa vaihteiden olevan merkittävä

värähtelyiden aiheuttaja junakalustossa. Jos junakalustoon kertynyt lumi siis irtoaa nimenomaan kiskon epäjatkuvuuskohdan aiheuttaman herätteen vaikutuksesta, on todennäköistä, että lumi irtoaa juuri vaihteen kohdalla.

Työssä saatiin samalla kuva junan yleisestä värähtelykäyttäytymisestä. Junan värähtelyt olivat samaa tasoa kaikilla rataosuuksilla Helsinki–Lappeenranta-välillä, mutta Lappeenranta–Joensuu-välillä värähtelytaso oli hieman suurempi. Erityisesti Parikkala–Joensuu-välillä keskimääräiset kiihtyvyydet olivat hieman suurempia kuin muilla rataosuuksilla. Nämä yleiseen värähtelykäyttäytymiseen liittyvät huomiot ovat kuitenkin vain arvioita, ja jatkossa junakaluston värähtelykäyttäytymistä voitaisiin tutkia ja analysoida tarkemmin.

Työssä mitattujen kiihtyvyystietojen analysoinnissa päästiin tämän työn puitteissa vasta alkuun. Mitattuja kiihtyvyyksiä kannattaakin analysoida jatkossa yksityiskohtaisemmin. Tässä työssä kiihtyvyyksiä tarkasteltiin vain maksimikiihtyvyyssamplitudien avulla, ja jatkossa kiihtyvyydatasta voitaisiin analysoida myös taajuuksia. Työssä mitattujen kiihtyvyyksien avulla on mahdollista saada tietoa myös esimerkiksi junakaluston värähtelykäyttäytymisestä radan kaarteissa. Lisäksi työssä käytetyillä mittaussjärjestelyillä (luku 5.3) on mahdollista saada selville junakalustoon kertyneen lumen irtoamisen ja junakaluston kiihtyvyyksien välinen yhteys.

Laskelmien avulla käytiin läpi vielä kisko jatkoksen ja kiskopomppun aiheuttamia kiihtyvyyksiä matkustaja- ja tavaravaunussa. Lyhyen kiskosta alaspäin suuntautuvan epäjatkuvuuskohdan, kisko jatkoksen, ei todettu aiheuttavan juuri suoran rataosuuden värähtelytasosta poikkeavia värähtelyitä junakalustoon. Laskuissa havaittiin, että kisko jatkoksen aiheuttama herätevaikutus ei kasva junan nopeuden kasvaessa. Kiskon epäjatkuvuuskohdan aiheuttamat iskuvoimat eivät siis tässä tapauksessa ole suoraan verrannollisia junan nopeuteen. Tämä voi johtua kisko jatkoksen pituudesta: epäjatkuvuuskohta on niin lyhyt, ettei juna ehdi reagoimaan siihen suuremmilla nopeuksilla juuri lainkaan. Hieman pidempi kiskosta ylöspäin suuntautuva epäjatkuvuuskohta, kiskopomppu, voi sen sijaan aiheuttaa junakalustoon vastaavia kiihtyvyyksiä kuin vaihteet.

Tavaravaunun maksimikiihtyvyyssamplitudit olivat lähes poikkeuksetta suurempia kuin matkustajavaunulla. Dynamiikkaohjelmalla selvitettiin vielä matkustaja- ja tavaravaunun ominaistuuksia ja niitä vastaavat värähtelymuodot, joita voidaan myöhemmin hyödyntää junien värähtelykäyttäytymisen tutkimisessa. Ominaisuuksien avulla on mahdollista hyödyntää esimerkiksi resonanssi-ilmiötä lumen irrottamiseksi junakalustosta. Lisäksi dynamiikkaohjelmalla voidaan jatkossa tarkastella esimerkiksi epätasaisen kiskon vaikutusta junakaluston värähtelyihin.

Tutkimuksissa saatiin selville erilaisten epäjatkuvuuskohtien aiheuttamat maksimikiihtyvyyssamplitudit junakalustossa. Mittauksissa ja laskuissa saatuja arvoja ei voi kuitenkaan suoraan verrata keskenään, sillä mittaavaunun massa- ja jousitusominaisuudet poikkeavat laskuissa käytettyjen tavaraja matkustajavaunujen ominaisuuksista. Voidaan kuitenkin sanoa, että vaihteet aiheuttavat selviä normaalitasosta poikkeavia värähtelyitä junakalustossa, ja kiskopomppun avulla on mahdollista saavuttaa vastaava värähtelytaso.

Junakaluston kiihtyvyyksien ja junakalustoon kertyneen lumen ja jään irtoamisen välistä yhteyttä tarkasteltiin yksinkertaistettujen laskujen avulla. Näiden avulla selvisi, ettei kiihtyvyys voi yleensä yksinään aiheuttaa lumen ja jään irtoamista junakalustosta. Lumen ja jään irtoamiseksi vaadittava kiihtyvyys on usein selvästi suurempi kuin mittauksissa saadut maksimikiihtyvyydet. Lunta kertyy eniten teliin ja vaunurunkoon, ja etenkin vaunurungossa kiihtyvyydet ovat hyvin pieniä. Vaunurungon kiihtyvyydet eivät riitä lumen irtoamiseen, ellei lumi ole erityisen heikosti kiinnittynyt rakenteeseen. Lumi tai jää voi kuitenkin irrota junakalustosta taipumien seurauksena, sillä jo pienetkin taipumat junakalustossa riittävät aiheuttamaan lumen tai jään murtumisen. Murtumisen seurauksena lumi tai jää voi irrota pienilläkin kiihtyvyyksisarvoilla.

Näiden tulosten suhteen on hyvä muistaa, että etenkin lumi voi olla kiinnittynyt rakenteeseen myös hyvin pienillä voimilla. Tällöin pienikin värähtely riittää lumen irtoamiseen. Yhtä lailla lumi voi olla kiinnittynyt myös niin suurilla voimilla, että mikään mitattu kiihtyvyyksisarvo ei saa lunta irtoamaan. Myös jään ja teräksen väliset kiinnittymisvoimat vaihtelevat melko paljon, ja yleisesti ottaen jää on kiinnittynyt rakenteeseen aina lujemmin kuin lumi. Junakalustoon kiinnittyneen lumen ja jään irtoamisen ja raiheen epäjatkuvuuskohtien välistä yhteyttä pitäisi tutkia vielä työssä esitetyn suunnitelman mukaisesti käytännössä, jotta saataisiin tarkempaa tietoa siitä, millaiset kiihtyvyydet riittävät lumen ja jään irtoamiseen.

LÄHTEET

Alstom. 2011. Alstom ja VR uudistavat Pendolino-junia. 19.8.2011. [WWW] [Viitattu 11.4.2012] Saatavilla: <http://www.alstom.com/press-centre/fi/2011/8/alstom-ja-vr-uudistavat-Pendolino-junia/>.

Andrews, E.H. & Lockington, N.A. 1983. The cohesive and adhesive strength of ice. *Journal of Materials Science*, 18 (1983), pp. 1455–1465.

Andrews, E.H., Majid, H.A. & Lockington, N.A. 1984. Adhesion of ice to a flexible substrate. *Journal of Materials Science*, 19, pp. 73–81.

Buckley, D.H. 1981. Surface effects in adhesion, friction, wear and lubrication. Elsevier Scientific Publishing Company. 631 p.

Colbeck, S.C. 1980. Dynamics of snow and ice masses. New York, Academic Press. 468 p.

Fish, A.M. & Zaretsky, Y.K. 1997. Ice strength as a function of hydrostatic pressure and temperature. US Army Corps of Engineers, CRREL Report 97-6, 10/1997. 14 p.

Freemeteo. 2012. Tunneittainen säähistoria 23.2.2012 kohteille Helsinki, Lappeenranta ja Joensuu. [WWW] [Viitattu 17.4.2012] Saatavilla: freemeteo.com.

Gold, L.W. Process of failure in ice. 1970. *Canadian Geotechnological Journal*, 7, pp. 405–413.

Guidelines to best practices for heavy haul railway operations: Wheel and rail interface issues. 2001. USA, International Heavy Haul Association (IHHA).

Hakulinen, P., Korkeamäki, S. & Nurmikolu, A. 2012. Katsaus liikkuvan kaluston ja radan vuorovaikutuksen perusteisiin. Julkaistavana Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä -sarjassa. Tampere.

Hirochi, T., Maeda, Y., Yamada, S., Shirakashi, M., Hattori, M. & Saito, A. 2004. Flow patterns of ice/water slurry in horizontal pipes. *Journal of Fluids Engineering*, vol.126, May 2004, pp. 436–441.

Hobbs, P.V. 1974. Ice physics. Oxford, Clarendon press. 837 p.

Holttinen, H., Liukkonen, S., Furustam, K.-J., Määttänen, M., Haapanen, E. & Holttinen, E. 1998. Offshore-tuulivoima Perämeren jääolosuhteissa. Espoo, VTT Julkaisuja 828. 118 s.

Ilmatieteen laitos. 2012. Teematietoa. [WWW] [Viitattu 27.2.2012] Saatavilla: ilmatieteenlaitos.fi.

Ilta-Sanomat. 2011. Jäänestosta apua junaliikenteen talvipulmiin. 4.1.2011. [WWW] [Viitattu 11.4.2012] Saatavilla: <http://www.iltasanomat.fi/kotimaa/jaanestosta-apua-junaliikenteen-talvipulmiin-/art-1288360366059.html>.

Iwnicki, S. 2003. Simulation of wheel-rail contact forces. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures 26, pp. 887–900.

Janda Lab. 2008. University of California. [WWW] [Viitattu 26.7.2012] Saatavilla: <http://chem.ps.uci.edu/~kcjanda>.

Javan-Mashmool, M. 2005. Theoretical and experimental investigations for measuring interfacial bonding strength between ice and substrate. Master study. Université du Québec. 127 p.

Jellinek, H.H.G. 1958. The influence of imperfections on the strength of ice. Proc. phys. Soc. 71, pp. 797–814.

Jellinek, H.H.G. 1959. Adhesive properties of ice. Journal of Colloid Science, 14, pp. 268–280.

Jellinek, H.H.G. 1960. Adhesive properties of ice, part II. Illinois, U.S. Army Snow Ice and Permafrost Research Establishment, Research report 62. 10 p.

Jellinek, H.H.G. 1962. Ice adhesion. Can. J. Phys. 40, pp. 1294–1309.

Jones, S.J. 1982. The confined compressive strength of polycrystalline ice. Journal of Glaciology 28, 98, pp. 171–177.

Junnikkala, J. & Untinen, J. 2011. Kokeilu jään poistamiseksi kiskon epäjatkuvuuskohdan avulla. Loppuraportti 18.2.–6.4.2011. Oulu. Oulun yliopisto. 10 s. + liitt. 1 s.

Kasaai, M.R. & Farzaneh, M. 2004. A critical evaluation methods of ice adhesion strength on the surface of materials. Proceedings of OMAE04, 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vancouver, BC, Canada, June 20–25, 2004.

Kermani, M., Farzaneh, M. & Gagnon, R. 2007. Compressive strength of atmospheric ice. *Cold Regions Science and Technology* 49, pp. 195–205.

Kivioja, S., Kivivuori, S. & Salonen, P. 2007. Tribologia – kitka, kuluminen ja voitelu. Helsinki, Helsinki University Press. 346 p.

Kloow, L. & Jenstav, M. 2006. High-speed train operation in winter climate. Banverket, Gröna tåget. 62 p.

Kloow, L. 2011. High-speed train operation in winter climate. KTH Railway Group Publication 1106. 77 p.

Kolisoja, P., Järvenpää, I. & Mäkelä, E. 2000. Ratarakenteen instrumentointi ja mallinnus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 5/2000.

Korkeamäki, S. 2011. Rataan kohdistuva kuormitus liikkuvan kaluston ja radan vuorovaikutuksessa. Helsinki, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 04/2011. 93 s.

Lei, X. & Noda, N.-A. 2002. Analyses of dynamic response of vehicle and track coupling system with random irregularity of track vertical profile. *Journal of Sound and Vibration* 258(1), pp. 147–165.

Li, D., Elkins, J., Wu, H. & Singh, S. 1999. Characterization of track stiffness and damping parameters. Report No. R-930.

Liikennevirasto. 2010. Talvi 2009–2010 Suomen rautateillä – tapahtumat ja johtopäätökset. Helsinki, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 15/2010. 55 s.

Lähteenmäki, M. 2007. Värehtelymekaniikka. Opintojakson arkistomateriaali. Tampere, Tampereen ammattikorkeakoulu. 123 s. [WWW] [Viitattu 11.5.2012] Saatavilla: http://home.tamk.fi/~mlahteen/arkistot/vmek_ark.htm.

Makkonen, L. 1994. Ice and construction. Cambridge, University Press, RILEM Report 13. 97 p.

Martinec, J. 1977. Expected snow loads on structures from incomplete hydrological data. *Journal of Glaciology* 19 (81), pp. 185–195.

Meuler, A.J., Smith, J.D., Varanasi, K.K., Mabry, J.M., McKinley, G.H. & Cohen R.E. 2010. Relationships between water wettability and ice adhesion. *ACS Applied Materials and Interfaces* 2(11), pp. 3100–3110.

Minnis, A.J. 2010. *Vampire Pro: Advanced tutorial guide. Simulating switches & crossings*. Derby, UK, DeltaRail Group Limited, 29 p.

Mohamed, A.M.A. & Farzaneh, M. 2011. An experimental study on the tensile properties of atmospheric ice. *Cold Regions Science and Technology* 68 (2011), pp. 91–98.

Nelson, W.G. & Young, E.J. 1994. Adhesion of fresh and saline ice to bare and coated steel surfaces. *OMAE – Volume IV, Arctic/Polar Technology*, pp. 63–66.

Oksanen, P. 1982. Adhesion strength of ice. Espoo. VTT Research Report 123. 61 s. + liitt. 5 s.

Oksanen, T. 1999. Suomen lumipeitteen alueellinen vaihtelu. Pro gradu -tutkielma. Helsinki. Helsingin yliopisto, Geofysiikan laitos. 66 s.

Petrenko, V.F. & Qi, S. 1999. Reduction of ice adhesion to stainless steel by ice electrolysis. *Journal of Applied Physics* 86, 5450.

Petrovic, J.J. 2003. Mechanical properties of ice and snow. *Journal of Materials Science* 38 (2003), pp. 1–6.

Railway Technical Research Institute, Tokyo Japan. 2004. Clarification of phenomenon of ballast thrown up by snow/ice falling from the train. [WWW] [Viitattu 8.5.2012] Saataavilla: http://www.rtri.or.jp/eng/rd/seika/2001/01/safety_E02.html.

Rao, S.S. 1995. *Mechanical vibrations*. Addison-Wesley Publishing Company. 912 p.

Raraty, L.E. & Tabor, D. 1958. The adhesion and strength properties of ice. *Proceedings of the Royal Society of London*.

Rasmus, S. 2007. Lumen fysiikka ja lumiekologia. Talvitutkimuksen päivä, Helsingin yliopisto, 23.11.2007.

Ratahallintokeskus. 2000. Ratatekniset ohjeet (RATO), osa 4 Vaihteet. Helsinki. 65 s. + liitt. 12 s.

Ratahallintokeskus. 2002. Ratatekniset ohjeet (RATO), osa 11 Radan päällysrakenne. Helsinki. 87 s. + liitt. 26 s.

Ratahallintokeskus. 2004. Ratatekniset ohjeet (RATO), osa 13 Radan tarkastus. Helsinki. 51 s. + liitt. 28 s.

Resiina-lehti. 2008. Tasoristeys-palsta 1/2008. [WWW] [Viitattu 8.5.2012] Saatavilla: <http://www.resiinalehti.fi/artikkeli/11>.

RIL. 2001. Lumirakenteiden suunnittelu- ja rakentamisohjeet, RIL218-2001. Helsinki, Suomen rakennusinsinöörien liitto. 75 s.

Ryerson, C. 2008. Assessment of superstructure ice protection as applied to offshore oil operations safety. US Army Corps of Engineers. ERDC/CRREL Technical Report 08-14. 142 p.

Ryzhkin, I.A. & Petrenko, V.F. 1997. Physical mechanisms responsible for ice adhesion. Journal of Physical Chemistry B, 101 (1997), pp. 6267-6270.

Salmenperä, P. & Nurmikolu, A. 2012. Esiselvitys vaihteiden lumiongelmien ratkaisumahdollisuuksista. Tampere, TTY. 28 s.

Salmi, T. & Virtanen, S. 2006. Dynamiikka. Tampere, Pressus Oy. 480 s.

Samppala, P. 2011. Rautateille asennettujen pyörävoimailmaisimien mittausdata ja pyörävoiman raja-arvot. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto. 100 s. + liitt. 35 s.

Schmid, F., Burstow, M., Clark, S., Eickhoff, B., Hiensch, M., Hsu, S. & Kent, S. 2010. Wheel-rail best practice handbook. University of Birmingham Press. 500 p.

Schulson, E.M. 2001. Ice: Mechanical properties. Encyclopedia of Materials: Science and Technology, 2nd edition, Cambridge University Press, pp. 4006–4018.

Seligman, G. 1936. Snow structure and ski fields. London, Macmillan & Co. 555 p.

Seppings, R.A. 2005. Investigation of ice removal from cooled metal surfaces. Doctor of Philosophy thesis. London. University of London. 262 p.

Shapiro, L.H., Johnson, J.B., Sturm, M. & Blaisdell, G.L. 1997. Snow mechanics, Review of the state of knowledge and applications. US Army Corps of Engineers, CRREL Report 97-3, 08/1997.

Smith, K. 2010. Future points to brushes. International Railway Journal, January 2010.

Thomson, W.T. 1989. Theory of vibration with applications. 3rd edition, 2nd impression. London, Unwin Hyman Ltd. 467 p.

Tongue, B.H. 1996. Principles of vibration. New York, Oxford University Press. 464 p.

Transportation Technology Center Inc. 2010. Vertical and lateral dynamics. Railway Derailment Course. 167 p.

US Army Corps of Engineers. 2003. Progress in evaluating surface coatings for icing control at corps hydraulic structures. ERDC/CRREL Technical Note 03-4, 10/2003.

VR Group. 2011. VR Group tiedottaa: VR tehostaa talviliikennöintiä. [WWW] [Viitattu 11.4.2012] Saatavilla: http://www.vrgroup.fi/fi/vakiolinkit/VR-konsernitiedottaa/news_20110104114643.html.

WeatherOnline. 2012. Weather facts: drifting snow, blowing snow. [WWW] [Viitattu 27.2.2012] Saatavilla: <http://www.weatheronline.co.uk/>.

Wilen, L.A., Wettlaufer, J.S., Elbaum, M. & Schick, M. 1995. Dispersion-force effects in interfacial premelting of ice. Phys. Rev. B 52, pp. 12426–12433.

Xu, X., Jeronimidis, G. & Atkins, A.G. 2003. On the yield stress of frozen sucrose solutions. Journal of Materials Science, 38, pp. 245–253.

Xu, X., Jeronimidis, G., Atkins, A.G. & Trusty P.A. 2004. Rate-dependent fracture toughness of pure polycrystalline ice. Journal of Materials Science, 39, pp. 225–233.

Zhai, W. & Cai, Z. 1997. Dynamic interaction between a lumped mass vehicle and a discretely supported continuous rail track. Computers and Structures 63 (5), pp. 987–997.

Zou, M., Beckford, S., Wei, R., Ellis, C., Hatton, G. & Miller, M.A. 2010. Effects of surface roughness and energy on ice adhesion strength. Applied Surface Science 257, pp. 3786–3792.

Zw 900 NT Technical specification. 1997. Teknikum Oy.